
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Máster en Sistemas Mecánicos

Departamento: Ingeniería de diseño y fabricación

Área: Ingeniería de Procesos de Fabricación



Trabajo Final de Máster

<p>ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES DE EMBUTICIÓN EN COPA CILÍNDRICA SOBRE CHAPA DC03</p>

Autor: Victor Cásedas Tejada

Director: Emilio Royo Vázquez

Junio, 2011

Agradecimientos

A mi director del Trabajo Fin de Master, Emilio Royo, por el tiempo dedicado, sus consejos, sugerencias y correcciones.

A los profesores del Master de Sistemas Mecánicos por los conocimientos adquiridos gracias a ellos.

A mi familia por su apoyo durante todo este tiempo.

Zaragoza, Junio 2011

Victor Cásedas Tejada

Estudio de la influencia de los factores de embutición en copa cilíndrica sobre chapa DC03.

Resumen

La embutición de chapas metálicas es uno de los procedimientos más comunes de elaboración de piezas para diversas aplicaciones, que van desde el hogar, hasta la industria en general. Es el proceso ideal para la fabricación de piezas en chapa fina con superficies complejas y altas exigencias dimensionales.

La embutición de copa cilíndrica, motivo de estudio de este trabajo, es el proceso de conformación más característico del estado de tensiones y deformaciones de la “embutición pura”. Éste se realiza de todos los tamaños, desde pequeñas copas del tamaño de la punta de un lápiz, hasta tanques para gas de soldadura de 6’5 mm de espesor y 1’22 m de diámetro. A pesar de esta diferencia de dimensiones, los embutidos de copa siguen el mismo método de conformado y están definidos por los mismos factores o parámetros. Diferentes investigadores han profundizado en la influencia de distintos factores para diferentes materiales. El presente trabajo pretende el análisis de cómo responde el adelgazamiento de la chapa ante la variación de distintos factores de control, cuyos rasgos corresponden a un caso práctico del sector de electrodomésticos.

En primer lugar se realiza un análisis del estado del arte, consultando bibliografía especializada y artículos de investigación. A partir de este análisis se prepara un Diseño de Experimentos, el cual se desarrolla mediante simulación por elementos finitos y posteriormente mediante ensayos en prensa. Los parámetros elegidos principalmente para este proyecto son: Radio de la matriz, Radio del punzón, holgura, razón límite de embutición (RLE) y fuerza de pisado (BHF), con función de estudio el adelgazamiento en la zona más crítica. Se realiza sobre chapa DC03 y los valores que tomarán para el estudio cada uno de los factores son los siguientes:

Rm y Rp: 2,5 , 4 y 5,5 mm. Holgura: 10% - 20%. RLE: 1,8 – 2. BHF: 5000-9000 kg

Para todo esto, se utiliza el programa Autoform para realizar las simulaciones por elementos finitos y el programa Minitab para el análisis estadístico del Diseño de Experimentos y el ajuste del modelo de regresión. Se comparan los resultados con la caracterización del problema obtenida con el módulo Autoform Sigma.

Posteriormente se llevan a cabo los ensayos en la prensa, obteniendo nuevamente un modelo de regresión de la función objetivo, comparándola con la obtenida previamente. De esta forma, se ve si se ajustan los resultados obtenidos en las simulaciones con las piezas de copa cilíndrica reales.

ÍNDICE

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
2.1 Tipos de ensayos.....	3
2.2 Proceso de embutición.....	5
3. SECCIÓN EXPERIMENTAL.....	7
3.1 Diseño de Experimentos.DOE.....	7
3.2 Simulación en Autoform.FEM.....	9
3.2.1 Módulo Sigma Regular Grid (RG).....	9
3.2.2 Módulo Sigma Robust Engineering (RE).....	11
3.3 Ensayos en prensa.....	13
3.4 Caracterización del material. Ensayos de tracción.....	15
3.4.1 Motivo y objetivo del estudio.....	15
3.4.2 Procedimiento de los ensayos.....	16
3.4.3 Desarrollo de los cálculos de r y n.....	18
4. RESULTADOS.....	21
4.1 Resultados Minitab.....	21
4.2 Resultados Sigma RE.....	23
4.3 Comparación resultados Minitab - Autoform.....	26
4.4 Resultados ensayos en prensa.....	26
4.5 Resultados ensayos de tracción.....	27
5. CONCLUSIONES.....	29
6. BIBLIOGRAFÍA.....	31

ANEXOS

ANEXO A. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	35
ANEXO B. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO.....	37
B.1 El proceso de embutición.....	37
B.1.1 Definiciones del proceso.....	37

B.1.2 Desarrollo del proceso.....	38
B.1.3 Prensas de embutición.....	42
B.1.3.1 Tipos de prensas hidráulicas	44
B.1.4 Troquel.....	46
B.1.5 Capacidad embutido profundo.....	50
B.1.5.1 Anisotropía planar.....	52
B.1.6 Esfuerzos producidos en el material.....	53
B.1.7 Defectos en la embutición.....	56
B.1.8 Otras operaciones / procesos de embutido.....	64
B.2 Deformación plástica de los materiales.....	67
B.2.1 Deformación plástica.....	67
B.2.1.1 Cambios de forma y concepto de deformación.....	67
B.2.1.2 Sistema de deslizamiento en los metales y deformabilidad...	68
B.2.1.3 Curva de esfuerzo-deformación ingenieril.....	69
B.2.1.4 Curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera.....	69
B.2.2 Criterios de fluencia.....	70
B.2.2.1 Criterio de energía máxima de distorsión.....	70
B.2.3 Límites de deformación.....	72
B.2.3.1 Curva Límite de Deformación FLC.....	72
B.2.3.2 Diagrama Límite de Deformación FLD.....	72
B.2.4 Procesos de deformación.....	73
B.2.4.1 Trabajo en frío.....	73
B.2.4.2 Reforzamiento para el trabajo en frío.....	74
B.2.5 Acero tipo DC03.....	75
ANEXO C. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	77
C.1 Simulación en Autoform.....	77
C.1.1 Módulos de Autoform.....	78
C.1.2 Aplicación en copa cilíndrica.....	82
C.2 Prensa.....	84
C.3 Minitab. Software de tratamiento estadístico de datos.....	88
C.3.1 DOE. Diseño de experimentos.....	90
C.3.2 DOE de dos niveles. Aplicación en copa cilíndrica.....	95

ANEXO D. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL. ENSAYOS EN	
PRENSA Y CAPTURA DE DATOS.....	99
D.1 Elementos principales.....	99
D.1.1 La prensa y sus principales componentes.....	99
D.1.2 Sensor PCD-300.....	104
D.1.2.1 Conexión de las galgas al PCD-300.....	105
D.2 Pasos para realizar el ensayo.....	106
D.3 Funcionamiento de la prensa	109
D.3.1 Programación.....	111
D.4 Programa KYOWA PCD.....	115
D.5 Captura datos de la retícula.....	121
ANEXO E. RESULTADOS.....	125
E.1 Análisis de resultados de la simulación.....	125
E.2 Análisis de resultados del estudio estadístico.....	129
E.3 Análisis de los resultados en prensa.....	139
E.4 Conclusiones. Comparación simulación & ensayos.....	140
ANEXO F. ESTUDIO ADICIONAL. CARACTERIZACIÓN DEL	
MATERIAL.....	143
F.1 Procedimiento de los ensayos de tracción.....	143
F.2 Extracción de datos.....	146
F.3 Cálculos y análisis.....	147

1. Introducción y objetivos

Para evaluar la conformabilidad de un material metálico, se puede realizar mediante ensayos mecánicos o ensayos simulativos. Los primeros se orientan hacia la determinación de características mecánicas de los materiales, y en este sentido los ensayos más destacados serían los de tracción y dureza. En cuanto a los segundos, intentan reproducir condiciones reales de conformado, es decir, condiciones tanto internas como externas. Esto es muy difícil dado el elevado número de factores. Entre los ensayos simulativos, uno muy utilizado, es el denominado ensayo Swift. En éste, un disco metálico es obligado a fluir al interior de una matriz, mediante la acción de un punzón. Así pues, en tal ensayo se centrará el presente proyecto.

Por otro lado, decir que también se realizará un estudio de alguna propiedad mecánica del material (es el caso de n y r), mediante la realización de ensayos de tracción. Éste estudio surge posteriormente al principal de nuestro proyecto (ensayo Swift), debido a los resultados inesperados, y con la intención de comprobar que los parámetros usados y facilitados por una empresa externa, eran los correctos. Además se analiza el cambio del valor del parámetro n en relación a la deformación sufrida.

Con todo esto, se pasa a describir el objetivo principal de este proyecto. Éste es el estudio del adelgazamiento de la chapa DC03 en embutición de copa cilíndrica con matriz y punzón de F521, utilizada en la puerta de lavavajillas, según la variación de algunos factores de embutición.

Para lograr lo anteriormente nombrado, en primer lugar se realiza un análisis del estado del arte, consultando bibliografía especializada y artículos de investigación. A partir de este análisis se prepara un Diseño de Experimentos, el cual se desarrolla mediante simulación por elementos finitos y posteriormente mediante ensayos en prensa. Los parámetros elegidos principalmente para este proyecto son: Radio de la matriz (R_m), Radio del punzón (R_p), holgura, razón límite de embutición (RLE) y fuerza de pisado (BHF), con función de estudio el adelgazamiento en la zona más crítica. Se realiza sobre chapa DC03 y los valores que tomarán para el estudio cada uno de los factores son los siguientes:

R_m y R_p : 2,5, 4 y 5,5 mm. Holgura: 10% - 20%. RLE: 1,8 – 2. BHF: 5000-9000 kg

Para todo esto, se utiliza el programa Autoform para realizar las simulaciones por elementos finitos y el programa Minitab para el análisis estadístico del Diseño de Experimentos y el ajuste del modelo de regresión. Se comparan los resultados con la caracterización del problema obtenida con el módulo Autoform Sigma.

Posteriormente se llevan a cabo los ensayos en la prensa, obteniendo nuevamente un modelo de regresión de la función objetivo, comparándola con la obtenida previamente. De esta forma, se ve si se ajustan los resultados obtenidos en las simulaciones con las piezas de copa cilíndrica reales.

2. Antecedentes

Este capítulo presenta una breve revisión de los principales conocimientos relacionados con el presente proyecto. Una revisión más completa sobre el tema se encuentra en el Anexo B.

La importancia y aplicación actual de los procesos de deformación en la industria metalmecánica crean la necesidad de conocer sus variantes y principios para poderlos mejorar. En este sentido, es imprescindible conocer no solo las distintas variables de operación sino también el comportamiento y las propiedades de los materiales empleados en dichos procesos.

2.1 Tipos de ensayos

Resulta fundamental elegir el material adecuado a los requerimientos de diseño y proceso de estirado/embutición, condicionado por factores intrínsecos del material (composición y proceso siderúrgico) y factores externos (diseño matriz, carga, velocidad de punzón, lubricación...).

Para realizar esta elección, se realizan dos tipos de ensayos que se pasan a describir a continuación:

- Ensayos mecánicos.

Se denomina ensayo de materiales o mecánico, a toda prueba cuyo fin es determinar las propiedades mecánicas de un material. Los ensayos de materiales pueden ser de dos tipos, ensayos destructivos y ensayos no destructivos. Estos últimos permiten realizar la inspección sin perjudicar el posterior empleo del producto, por lo que permiten inspeccionar la totalidad de la producción si fuera necesario.

En cuanto a los ensayos no destructivos, algunos ejemplos son el ensayo por líquidos penetrantes, ensayos radiológicos, por ultrasonidos etc

Por otro lado, en cuanto a los destructivos, los ejemplos más comunes a lo largo de los años son el ensayo de tracción, compresión, flexión, torsión etc



- Ensayos simulativos.

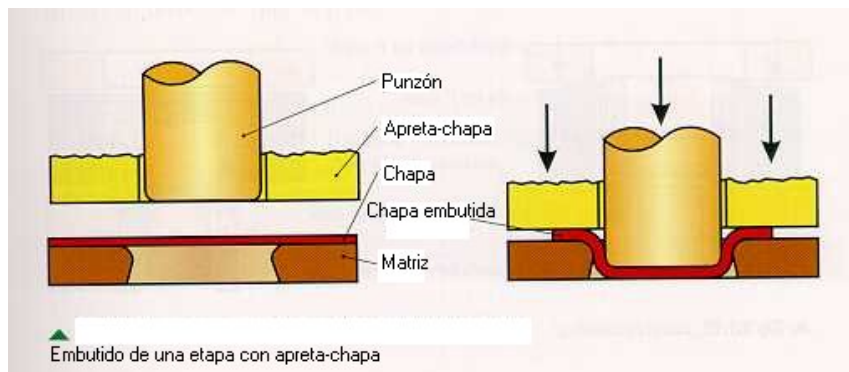
En estos se intenta reproducir tanto las condiciones internas como externas. Son bastante más complejos y difíciles debido al elevado número de factores que pueden influir. Por eso es de vital importancia elegir bien los factores a estudiar.

Hay varios tipos de ensayos y cada uno se centra en diferentes estados tensionales y de deformación. Éstos se pueden clasificar en tres grupos, los de tracción biaxial (ej:Erichsen modificado), los de embutición pura (ej:Swift) y los de deformación mixta (ej:Erichsen original).

Ensayos a tracción biaxial o expansión	— Expansión bajo presión hidráulica	— Ensayo Jovignot (19)
	— Expansión bajo acción mecánica de un punzón	— Bulge Test (20)
Ensayos de embutición pura o contracción (Retreint)	— Ensayo A.E.G.	— Ensayo Erichsen (Modificado)
	— Ensayo Swift - I.D.D.R.G. (Punzón cilíndrico)	— Ensayo Olsen
Ensayos a deformación mixta (Tracción biaxial + Embutición pura)	— Ensayo Erichsen (Original)	— Ensayo Persoz
	— Ensayo Swift - I.D.D.R.G. (Punzón esférico)	
	— Ensayo Fukui	
	— Ensayo Renault (Elipsoidal) (21)	
	— Ensayo Chausson (Semicilíndrico)	
	— Ensayo Engelhardt - TZP (22)	
	— Ensayo Herzog (23)	

2.2 Proceso de embutición

Las piezas recortadas o discos a emplear se disponen en el asiento o anillo de centrado, fijado a la matriz de embutir, con la finalidad de centrar el disco en el proceso de embutición. Un dispositivo pisador aprieta el disco contra la matriz de embutir con la finalidad de que no se produzcan pliegues. El punzón de embutir al bajar estira el material sobre los bordes redondeados de la matriz, de modo que se produzca una pieza hueca. El desplazamiento de todos los cristales en que está constituido el material a embutir es radical en toda su magnitud. Cada uno de los cristales del material se desplaza, en la medida de que este se desliza en la abertura entre el punzón y la matriz.



La fricción es un factor que debe tenerse en cuenta por cuanto el material se desliza en la abertura entre el punzón y la matriz. Por lo tanto esta área debe estar pulida y lapeada. Esto reduce la carga necesaria para el desarrollo del embutido. El redondeo de los bordes de la matriz ayuda a la chapa a resbalar por la pared del agujero, facilitando la operación de embutir. Facilitan también el embutido la lubricación adecuada del disco recortado y de la herramienta en su conjunto.

El juego que queda entre el punzón y la matriz de embutir tiene que ser mayor que el espesor de la chapa. Se han acreditado como conveniente para el caso de chapas de acero, holguras de 1,12 a 1,30 veces el espesor de la chapa, para chapas de latón, holguras de 1,08 a 1,20 veces el espesor, para chapas de aluminio la holgura es de 1,04 a 1,10 veces el espesor.

Así pues, se puede observar de la bibliografía y estudios anteriores sobre este proceso, que los factores más importantes y a tener en cuenta son los radios de las matrices y punzones, el juego u holgura entre punzón y matriz, la fuerza con la que actúa el pisador, las dimensiones de la preforma en relación al punzón a utilizar, o el lubricante utilizado.

3. Sección experimental

3.1 Diseño de experimentos. DOE

Diseñar un experimento significa planear un experimento de modo que reúna la información pertinente al problema bajo investigación. Es decir, es la secuencia completa de pasos tomados de antemano para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido.

En este proyecto se realiza un diseño de experimentos de dos niveles. Se opta por un diseño 2^k con $k = \text{nº de factores} = 5$. No se utilizan en ningún momento puntos centrales.

Los factores y sus rangos son los siguientes:

- Radio matriz y Radio punzón de 2,5 – 5'5 mm
- RLE 1,8 – 2
- BHF 5000 – 9000 Kg
- Holgura 10 - 20%

Comentar que posteriormente y con intención de reducir el número de ensayos en prensa, el diseño 2^5 se convierte en 2^4 . Se retirará un factor, en este caso la holgura, pos mostrarse poco relevante en los resultados tanto en Minitab como en Autoform.

Decir también, que los valores de adelgazamiento que se observan en la siguiente tabla de la próxima hoja, han sido extraídos uno por uno, seleccionando los que nos interesaban para el estudio, de las 243 corridas del estudio inicial Regular Grid de Autoform (explicado en el siguiente apartado).

Tabla que muestra la combinación de todos los factores del estudio.

<u>RLE</u>	<u>BHF</u>	<u>Rm</u>	<u>Rp</u>	<u>Holgura</u>	<u>ThinningMed</u>
1,8	5000	2,5	2,5	0,08	13,28
2	5000	2,5	2,5	0,08	14,49
1,8	9000	2,5	2,5	0,08	14,21
2	9000	2,5	2,5	0,08	17,05
1,8	5000	5,5	2,5	0,08	6,69
2	5000	5,5	2,5	0,08	8,88
1,8	9000	5,5	2,5	0,08	8,56
2	9000	5,5	2,5	0,08	10,32
1,8	5000	2,5	5,5	0,08	13,43
2	5000	2,5	5,5	0,08	14,80
1,8	9000	2,5	5,5	0,08	14,91
2	9000	2,5	5,5	0,08	16,23
1,8	5000	5,5	5,5	0,08	6,59
2	5000	5,5	5,5	0,08	8,58
1,8	9000	5,5	5,5	0,08	8,19
2	9000	5,5	5,5	0,08	10,59
1,8	5000	2,5	2,5	0,16	13,04
2	5000	2,5	2,5	0,16	15,75
1,8	9000	2,5	2,5	0,16	15,70
2	9000	2,5	2,5	0,16	16,31
1,8	5000	5,5	2,5	0,16	6,54
2	5000	5,5	2,5	0,16	8,82
1,8	9000	5,5	2,5	0,16	8,42
2	9000	5,5	2,5	0,16	10,37
1,8	5000	2,5	5,5	0,16	13,50
2	5000	2,5	5,5	0,16	15,11
1,8	9000	2,5	5,5	0,16	14,97
2	9000	2,5	5,5	0,16	16,68
1,8	5000	5,5	5,5	0,16	6,68
2	5000	5,5	5,5	0,16	8,75
1,8	9000	5,5	5,5	0,16	8,52
2	9000	5,5	5,5	0,16	10,29

Tabla 1

3.2 Simulación en Autoform. FEM

Con el objeto de analizar y mejorar la robustez de las futuras piezas metálicas, se realiza esta simulación. De esta forma se quiere validar y mejorar el proceso de conformado reduciendo o incluso eliminando los defectos de las piezas.

Posteriormente se comprobará si los resultados obtenidos en esta simulación se corresponden con las piezas reales.

3.2.1 Módulo Sigma Regular Grid (RG)

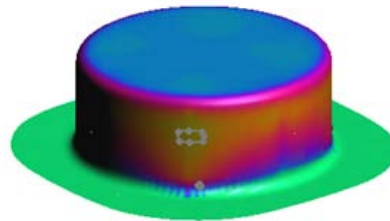
Se utiliza este módulo para realizar un estudio inicial. Se realiza un 3^k con $k=5$. Según esto saldrán un total de 243 simulaciones. Por ser RG de cada uno de los factores el programa tomará para el análisis el valor máximo, medio y mínimo. Es por este motivo por el cual éste es simplemente un estudio inicial o previo al RE que posteriormente se desarrolla.

El programa simula las 243 corridas para posteriormente poder analizar la respuesta del adelgazamiento, que es nuestro objetivo. Para ello primero se definen los rangos de nuestros factores:

Design variables			
Name	Current	Min	Max
● RLE	95	90	100
● BHF	7e+04	5e+04	9e+04
● Rp	4	2.5	5.5
● holgura	0.12	0.08	0.16
● Rd	4	2.5	5.5
<div> Edit variable Delete variable Delete all variables </div>			

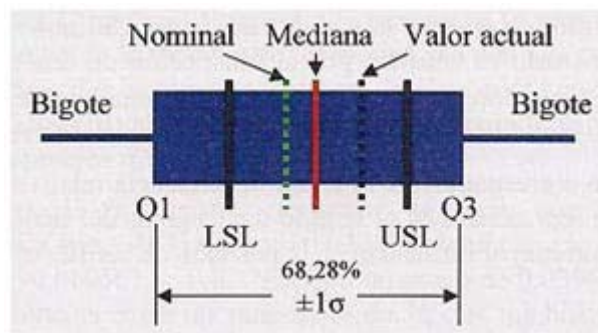
Se listan las 5 variables y sus rangos para la simulación se les llama variables de control (Variables de Diseño VD). El estudio RG se ha realizado para reducir la influencia del ruido. Además se ha realizado la prueba de normalidad a cada propiedad mecánica, por exigirlo los estudios de Fabricación Robusta.

Para realizar este análisis, es necesario definir, si es que existen, las zonas críticas de la pieza a estudiar. En este caso, se ha definido una zona de estudio: en esta zona se encuentra el mínimo adelgazamiento identificado en la ventana principal del programa.



Se muestra en el diagrama box-plot de la dispersión y el grado de asimetría de la variable respuesta en la zona correspondiente. El ancho de la caja indica la homogeneidad de los resultados dentro de la zona bajo estudio y, con ello, la idoneidad de la zona para llegar a ser considerada representativa.

Es decir, si se trata de una caja estrecha, los resultados de la zona serán homogéneos, por lo que la zona será representativa. En los bigotes, los casos atípicos y extremos indican hacia dónde se desplazan los valores más alejados del centro.



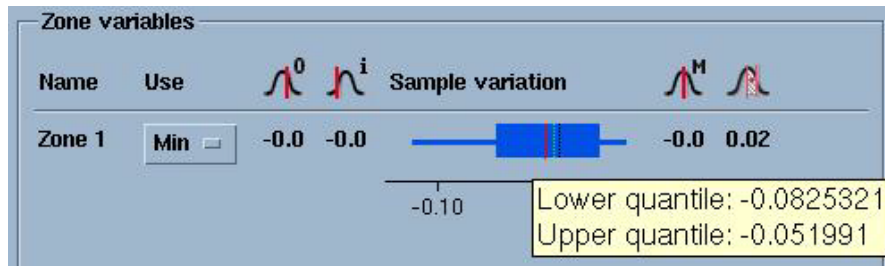


Diagrama de box-plot para la dispersión de la variable respuesta en la zona del conjunto de simulaciones realizadas.

3.2.2 Módulo Sigma Robust Engineering (RE)

A continuación se pasa a realizar el estudio RE. Éste es un estudio más robusto y más completo. La diferencia con el anterior, es que ahora en lugar de sólo tomar los puntos extremos y el medio, en el RE el programa toma un montón de valores aleatorios entre el máximo y el mínimo. Es decir, va tomando muchos valores distintos a lo largo de los rangos de cada factor. De esta forma el estudio es mucho más real y completo.

The screenshot shows the 'Setup' tab of the Sigma Robust Engineering (RE) software. The 'Analysis type' is set to 'RE: Performance analysis DESIGN'. Below, a table lists 'Design variables' with columns for Name, Current, Min, and Max.

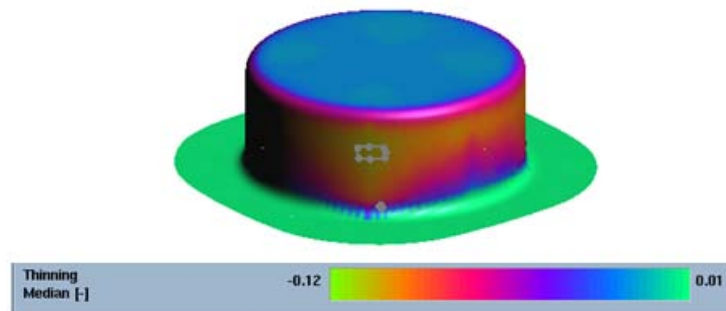
Name	Current	Min	Max
RLE	95	90	100
BHF	7e+04	5e+04	9e+04
Rp	4	2.5	5.5
holgura	0.12	0.08	0.16
Rd	4	2.5	5.5

Buttons at the bottom: Edit variable, Delete variable, Delete all variables.

Como se observa en la imagen anterior, de nuevo se listan las 5 variables y sus rangos para la simulación del Diseño Robusto, éstas son llamadas VD Variables de Diseño. El estudio RE se ha realizado para reducir la influencia del ruido. Además se ha realizado la prueba de normalidad a cada propiedad mecánica, por exigirlo los estudios de Fabricación Robusta.

Para realizar este análisis, es necesario definir, si es que existen, zonas críticas. En nuestro caso el área más crítica es la que se muestra en gris en la siguiente imagen. En ella se dan los mayores adelgazamientos.

Las zonas más amarillas es donde se dan los mayores adelgazamientos. Se puede observar que se da una zona de estas cada 90°.



3.3 Ensayos en prensa

Se resume el procedimiento para realizar los ensayos. Se muestra dividiéndolo en sencillos pasos. La información ampliada de todo este procedimiento se puede encontrar en el Anexo D.

Así pues, los principales pasos o apartados serían los siguientes:

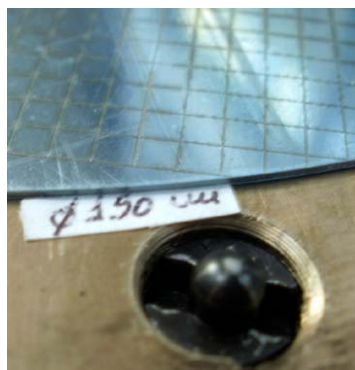
- Realizar la programación de la prensa del ensayo que queremos realizar. En el apartado D.3 se describe cómo hacerlo. Se recomienda primero probar en vacío para comprobar que el programa se ejecuta correctamente.



- En vacío verificar que las presiones de embutido son las adecuadas visionando en pantalla los valores. Regular con los tres dígitos de presión instalados en la prensa



- Tener marcado en el pisador donde colocar la chapa centrada. Para conseguir esto hay colocados unos pequeños tetones para la chapa de 200mm y un marcado de pintura describiendo la silueta de la chapa para el caso de 180mm.



- Colocar el pisador en posición de trabajo. Anteriormente, haber colocado las velas con sus células de carga correctamente.



- Limpiar con acetona la preforma a embutir. Posteriormente lubricarla con el rodillo destinado a esta función.



- Colocar preforma centrada en el pisador.



- Activar el programa KYOWA tras haberlo preparado. Colocar en modo monitor o grabación para poder observar las gráficas del ensayo.

- Prensa en modo automático y pulsar pedal para empezar a ejecutar el programa.
- Extraer la chapa ya embutida y limpiar el lubricante. Etiquetarla con todos datos necesarios para identificar el tipo de ensayo en el futuro.
- Después ya sólo quedará medir con la pistola de captura de datos en la zona requerida para proseguir con el análisis de resultados.



3.4 Caracterización del material. Ensayo de tracción

A modo de resumen, aquí simplemente se comentan brevemente los pasos principales seguidos para el desarrollo de los ensayos de tracción. Todo este apartado, así como el análisis de los resultados se encuentra más ampliamente desarrollado en el anexo F.

3.4.1 Motivo y objetivo del estudio

Este estudio surge posterior al estudio principal del proyecto, es decir, posterior al estudio de la influencia de factores en el caso de la embutición profunda sobre chapa DC03. Pues bien, una vez finalizado éste, y ante los sorprendentes resultados (analizados en el siguiente capítulo), se decide analizar el material nosotros con dos objetivos. El primero, es asegurarnos de que los valores intrínsecos del material proporcionados por el análisis del mismo en una empresa externa, y los cuales han sido utilizados en la simulación son correctos. En segundo lugar, estudiar para nuestro caso, la variación que podría tener el valor de n según la deformación a la que esté sometido el material en cada momento. Con este fin se proceden a realizar los mencionados ensayos de tracción.

3.4.2 Procedimiento de los ensayos

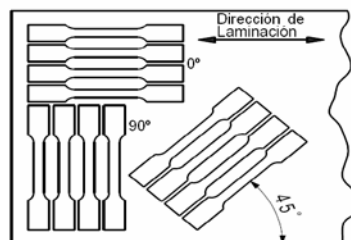
1.- Lo primero es proceder al estudio de las 2 normas que rigen cómo hacer estos ensayos. Ambas se pasan a citar a continuación:

- “Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n- Values) of Metallic Sheet Materials”

- “Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal”

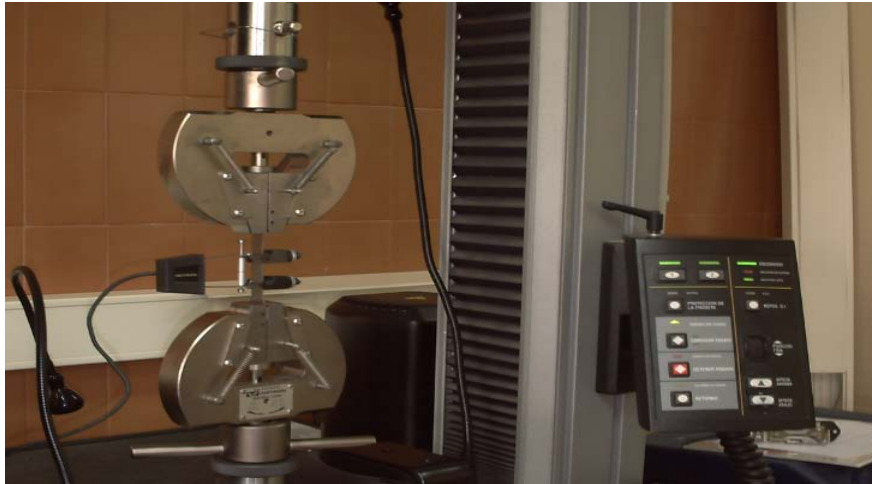
2.- En segundo lugar se pasa a abrir el programa para estos ensayos, su nombre es Merlín. Una vez se encuentra la aplicación en marcha hay que preparar o programar el método que vamos a utilizar. Es decir definir todos los parámetros para realizar los ensayos de tracción. Algunos ejemplos de parámetros imprescindibles de definir son la velocidad (según marca la norma), lo que se quiere medir (carga y deformación en este caso) o cada que intervalo se toman datos.

3.- Preparar las probetas según las cotas que marca la norma. Además es necesario que se tengan cortadas probetas a 0° , 45° y 90° .

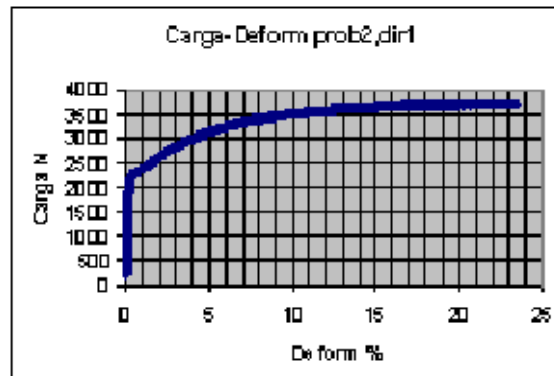


4.- Colocar la probeta en las mordazas de la máquina y acoplarle el extensómetro. Las dimensiones iniciales de la probeta deben haber sido registradas.

5.- Calibrar el extensómetro y reiniciar a 0 carga y de deformación.



6.- Comenzar el ensayo. En este caso no es necesario llegar a la rotura. Además sería peligroso llegar a tal estado ya que el extensómetro podría ser dañado. Una vez se observa que ya no aumenta más la carga se para el ensayo y se importan los datos a excel para trabajar con ellos.



3.4.3 Desarrollo de los cálculo de r y n

Se procede a realizar los cálculos según marca la norma.

- CÁLCULO DE r :

$$L_o = 25\text{mm}, W_o = 14'15\text{mm}$$

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t$$

$$\epsilon_t = \ln (L_o W_o / L_f W_f)$$

$$\epsilon_w = \ln (W_f / W_o)$$

Estos tres sencillos cálculo se harán para 0° , 45° y 90° , para posteriormente sacar los valores que interesan de r_m y Δr según el siguiente cálculo final:

$$r_m = r_{90} + 2 \times r_{45} + r_0 / 4 \quad \Delta r = r_{90} - 2 \times r_{45} + r_0 / 2$$

- CÁLCULO DE n :

La tensión utilizada en la curva tensión-deformación es la tensión media longitudinal producida en la probeta de tracción. Se obtiene dividiendo la carga por el área de la sección inicial de la probeta.

- Ensayo ingenieril:

$$\text{Tensión ingenieril } s = F / A_o \quad \text{Deformación ingenieril } e = \Delta L / L_o$$

La curva ingenieril no proporciona una indicación de las características de deformación de un metal porque está basada totalmente sobre las dimensiones iniciales de la probeta y estas cambian constantemente durante el ensayo. Además, los metales sufren estricción localizada durante la última fase del ensayo, la carga requerida para continuar la deformación disminuye en esta fase a causa de que el área de la sección transversal de la probeta se va reduciendo rápidamente. La tensión media basada en la sección inicial disminuye también, produciéndose como consecuencia de esto un

descenso de la curva tensión-deformación después del punto de carga máxima. En realidad, el metal continúa endureciéndose por deformación hasta que se produce la fractura, de modo que también debería aumentar la tensión requerida para producir mayor deformación. Si se utiliza la tensión real o verdadera basada en el área instantánea de la sección transversal de la probeta, se encuentra que la curva tensión-deformación asciende de modo continuo hasta que se produce la rotura.

Por tanto se utilizan coordenadas verdaderas

- Ensayo coordenadas verdaderas

Tensión verdadera $\sigma = F/A$; $\sigma = s(1+e)$; Deformación verdadera $\epsilon = \ln(L/L_0) = \ln(1+e)$

Para facilitar los cálculos mostrados en las tablas mostradas en el capítulo de resultados:

$$Y = \log \sigma$$

$$X = \log \epsilon$$

$$\text{Step1} = \Sigma X \times \Sigma Y / N$$

$$\text{Step2} = S_{xy} = \Sigma XY - \text{Step1}$$

$$\text{Step3} = (\Sigma X)^2 / N$$

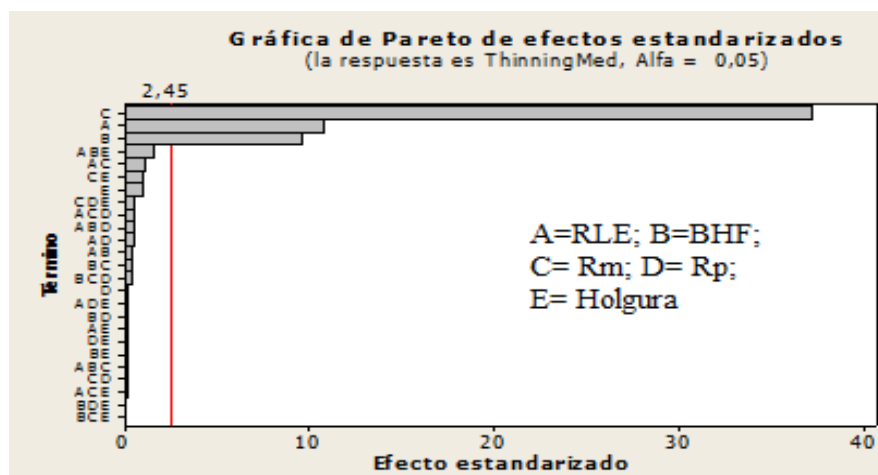
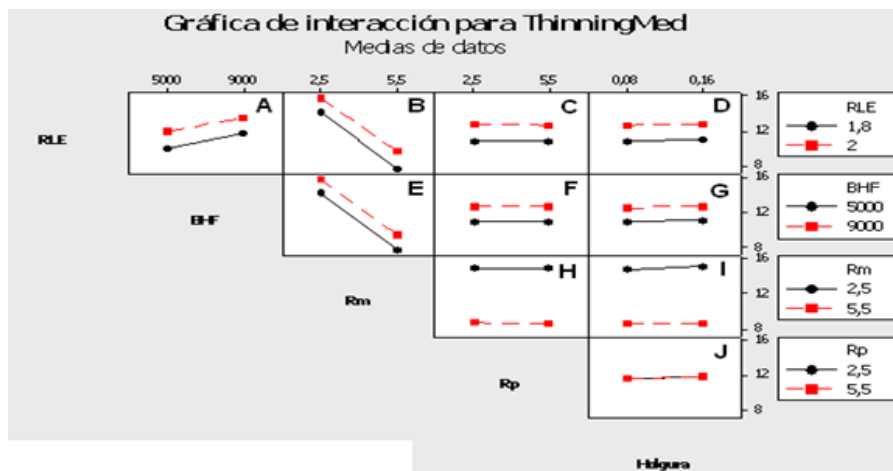
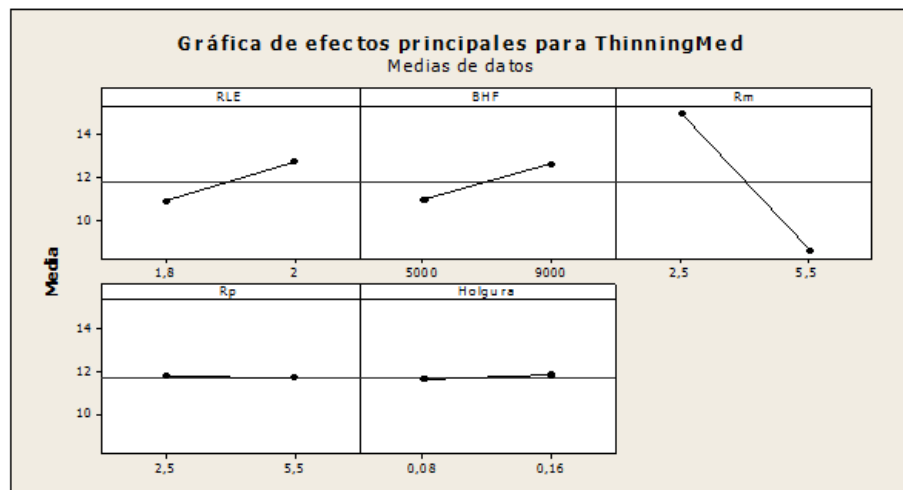
$$\text{Step4} = S_{xx} = \Sigma X^2 - \text{Step3}$$

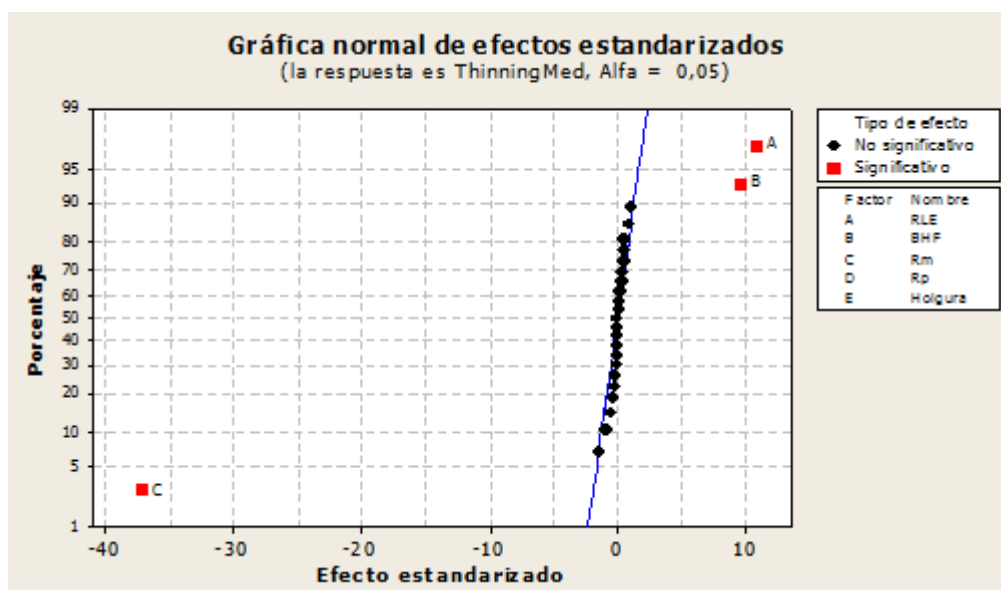
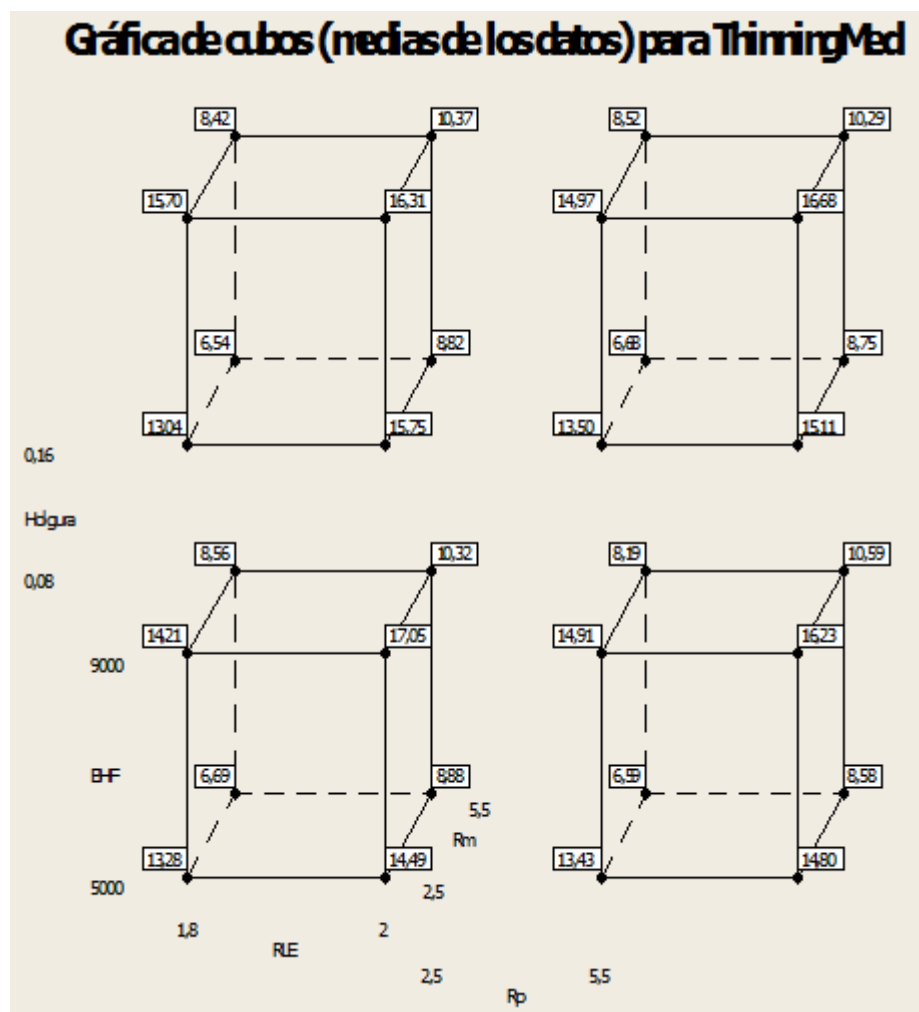
Así pues, se realizarán estos cálculos primero para extraer un valor genérico de n de nuestro material, y posteriormente para extraer valores de n en relación a la deformación sufrida. De esta forma se decidirá si el valor de n genérico introducido en nuestro estudio es válido o por el contrario es necesario meter un valor para un rango de deformación.

4. Resultados

4.1 Resultados Minitab

En primer lugar se muestran las gráficas más representativas y posteriormente se extraen resultados de las mismas.





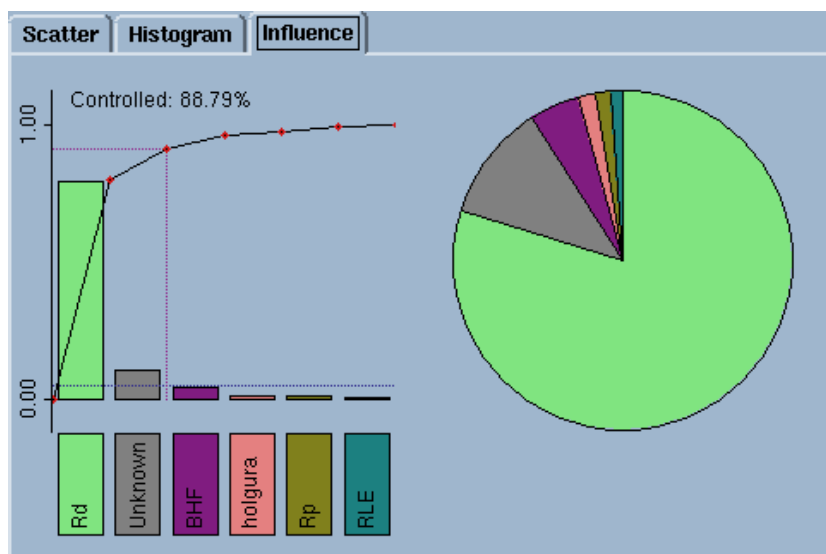
Así pues tras observar las gráficas más representativas, las cuales se interpretan a fondo en el anexo E, se puede concluir a modo de resumen que:

- El efecto que más influye en la respuesta de la variable de salida (thinning) es el radio de la matriz (Rm). Si nos centramos en éste, podemos observar que cuando éste varía de su mínimo a su máximo la variable de salida experimenta un gran cambio. Así pues con un radio en la matriz de 2,5 mm, el adelgazamiento que se experimente es del orden de 17% mientras que si aumentamos el radio hasta 5,5 mm, el adelgazamiento disminuiría hasta un 7 % más o menos.
- Los factores de Rp y holgura, al variar de su mínimo a su máximo tan apenas afectan a la variable de salida.
- El RLE y el BHF muestran un ligero ascenso en el adelgazamiento al alcanzar sus máximos correspondientes.
- Se observa que no hay interacción entre los factores.
- Donde se maximiza nuestra variable thinning, es en el punto cuyas coordenadas corresponden a $R_m = 2,5$, $RLE = 2$ y $BHF = 9000$.
- En el histograma, se observa que más o menos la distribución se adecua a forma de campana en torno a la normal. De esta forma queda claro que no hay valores atípicos ni se trata de una distribución sesgada.

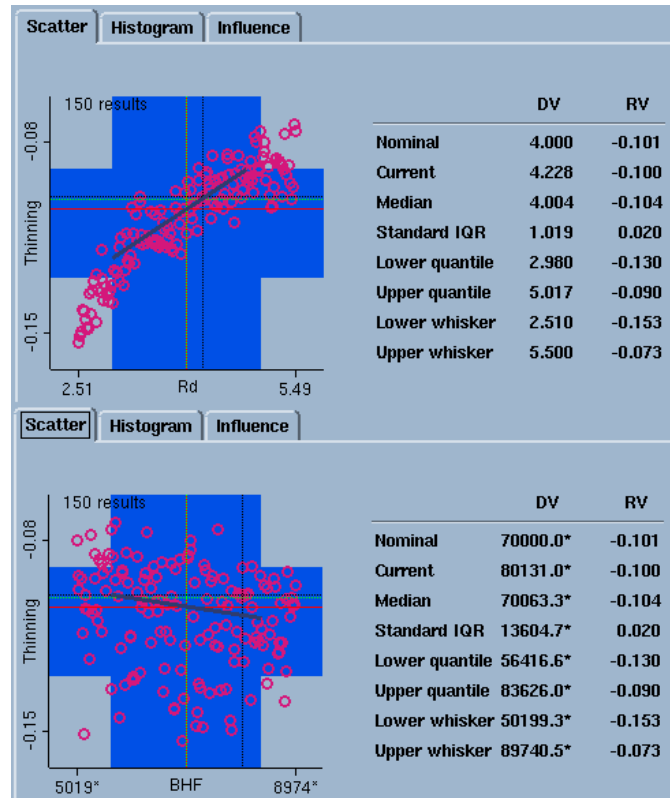
4.2 Resultados Resultados Autoform Sigma RE

A continuación se pasan a ver los resultados de la simulación (ampliado en anexo E), analizando las distintas herramientas que nos facilita Autoform:

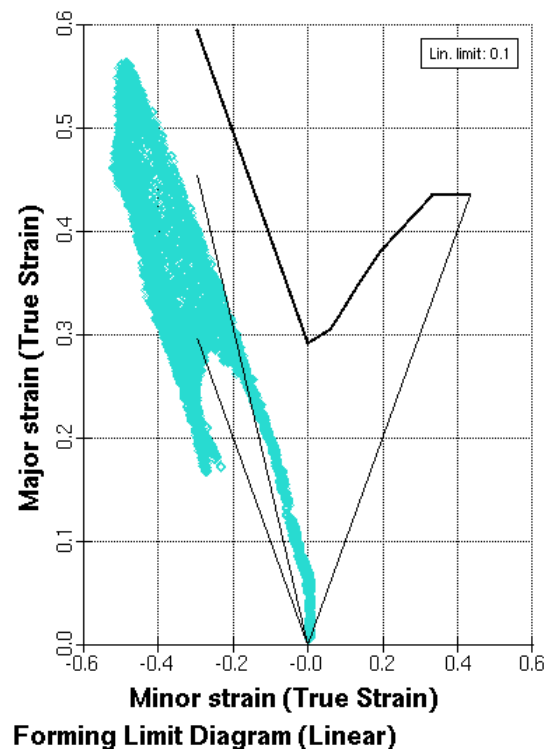
- Diagrama de tarta



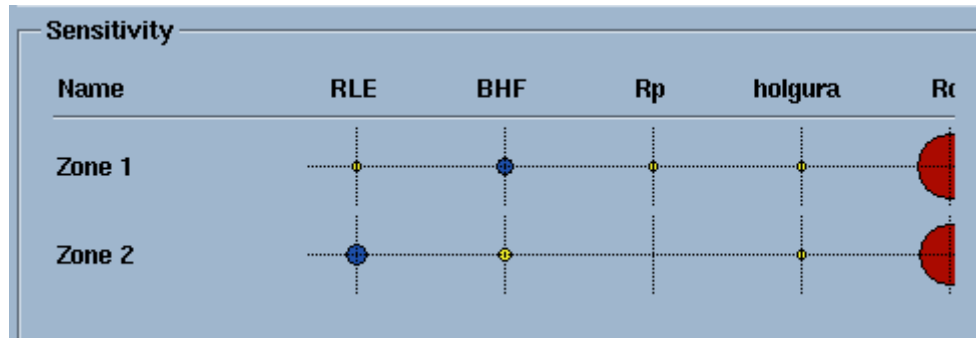
- Gráfico de dispersión (Scatter) de Radio Matriz y BHF



- Diagrama Límite de Conformado



- Matriz de influencia/sensibilidad



Así pues tras observar las gráficas más representativas, las cuales se interpretan a fondo en el anexo E, se puede concluir a modo de resumen que:

- El factor Rd (Radio matriz) es el más influyente para nuestra variable de respuesta thinning. Según esta simulación, es la más influyente con mucha ventaja respecto a las otras. Las siguientes, aunque con mucho menos peso, serían el BHF y el RLE. Las otras dos tan apenas influirán en el adelgazamiento de nuestras piezas.
- Con estas variables podemos controlar un 88'79 % del resultado final. El resto estará afectado por otro tipo de variables desconocidas, quizás en gran parte interacciones entre nuestras variables anteriormente nombradas
- Analizando nuestra variable más influyente, según el scatter concluimos que a mayor Rd disminuye el adelgazamiento.
- La zona donde se producirán los mayores adelgazamientos, se dará en la pared a unos 16 mm de su parte superior. Cada 90° se observa una zona de estas más críticas.
- En el histograma de la variable de respuesta, se observa que para la zona de estudio el adelgazamiento oscila entre un 8 y un 15%, siendo su rango de un 7%.
- Según el gráfico de variable dominante, se observa que en la pared (zona de estudio), el Rd es la más influyente, mientras que en la base sería el BHF y en el radio que une pared y base, el factor dominante sería el Radio punzón
- En el gráfico de influencia/sensibilidad observamos que el Rd es el círculo rojo y mucho más grande que el resto. Su dimensión es proporcional a la influencia de esta variable en relación a la variable de estudio y su color rojo denota que la variable respuesta aumenta si ésta también lo hace
- El diagrama límite de conformado FLD, nos muestra que no debería romper ninguna pieza en su fabricación real ya que ninguna simulación sobrepasa la línea límite, por lo que no se llegaría a la rotura.

4.3 Comparación resultados Minitab – Autoform

Tras haberse realizado el análisis por ambos métodos (Minitab y Autoform) se pueden extraer don conclusiones claramente diferenciadas. Éstas se pasan a enumerar a continuación:

1.- Ambos métodos concluyen en que el factor mas influyente en la variable de salida es el radio de la matriz (Rd). En los dos casos este factor viene muy destacado frente al resto.

2.- El análisis mediante Minitab muestra los factores BHF y RLE como relevantes ante el thinning. No de la misma manera que el Rd pero si se interpreta que ambos influyen lo suficiente como para tenerlos en cuenta. Por otro lado, el Autoform ya no muestra estos como suficientemente relevantes y concluye con que el único factor a tener verdaderamente en cuenta ha de ser el Rd.

4.4 Resultados Ensayos en Prensa

Una vez realizados los ensayos y extraídos los datos reales mediante la pistola analizadora de retícula, se procede a mostrar los mismos:

RLE	BHF (Kg)	Rm (mm)	Rp (mm)	Holgura (mm)	Adelgazamiento(%)
1,8	5000	2,5	2,5	0,08	Rompe
2	5000	2,5	2,5	0,08	Rompe
1,8	9000	2,5	2,5	0,08	Rompe
2	9000	2,5	2,5	0,08	Rompe
1,8	5000	5,5	2,5	0,08	7'5
2	5000	5,5	2,5	0,08	9'4
1,8	9000	5,5	2,5	0,08	9'1
2	9000	5,5	2,5	0,08	Rompe
1,8	5000	2,5	5,5	0,08	Rompe
2	5000	2,5	5,5	0,08	Rompe
1,8	9000	2,5	5,5	0,08	Rompe
2	9000	2,5	5,5	0,08	Rompe
1,8	5000	5,5	5,5	0,08	7'6
2	5000	5,5	5,5	0,08	8'9
1,8	9000	5,5	5,5	0,08	8'5
2	9000	5,5	5,5	0,08	Rompe

5. Conclusiones

Tras observar los resultados mostrados en los apartados anteriores, tanto en simulación como en la fabricación de las piezas reales, se pasa a extraer las siguientes conclusiones principales:

- * Los resultados obtenidos en la simulación no se ajustan a los resultados obtenidos en las piezas de copa cilíndrica reales. En varios casos, las piezas llegan a la rotura cuando el resultado de la simulación valoraba que no se llegaría a tal extremo.
- * En los casos restantes, es decir, cuando las piezas no llegan a romper, el resultado de nuestra variable de estudio, adelgazamiento, si se corresponde con los valores que anteriormente se extraían de la simulación.
- * El factor más influyente en nuestra variable de respuesta adelgazamiento, es el radio de la matriz. A continuación influye el RLE y el BHF con mucha menos importancia respecto al primero. Aún así son factores muy a tener en cuenta.
- * El factor del radio del punzón y la holgura interfieren de manera poco significativa en el adelgazamiento de las piezas.

A continuación y después de conocer las conclusiones principales o generales, se pasan a citar otras más particulares o que de alguna forma derivan de las anteriores:

- * La variable denominada Unknown, es decir aquellos factores que no podemos controlar, aunque según la simulación no es demasiado grande, a juzgar por los resultados parece que es determinante.
- * El método elegido de colocar tres células de carga en las velas y otra en el punzón es adecuado para tener en todo momento registrada la presión que se ejerce.
- * Se realiza un estudio adicional variando el coeficiente de fricción del lubricante, y no se observan cambios significantes en el resultado de la simulación
- * Se realiza una prueba real, rebajando un poco el diámetro del punzón y de esta forma aumentar la holgura, y se observa que tal y como decía el estudio previo, ésta no influye en el resultado final. Es más, cuando se aumenta la holgura, se empieza a observar un pequeño escalón debajo del radio. Este defecto viene causado por excesiva holgura. No conviene pues aumentarla más.

* Se realiza un estudio de cálculo del valor de n de nuestro material en relación de la deformación en cada momento, y se concluye que para este caso con una n para todo el rango de deformación es suficiente. No se aprecian diferencias significativas entre las n parciales y la n general.

* Como ya se sabe, las ventajas del método de elementos finitos son notorias, sin embargo en nuestro caso no han sido satisfactorias.

* Las piezas se rompen por una gradación excesiva en la embutición. Con el radio de la matriz de 2,5mm el escalonado es excesivamente grande en relación a la embutibilidad de este material. Los fondos se rompen, ya antes de formarse la pared lateral, en la zona muy próxima a la brida de la chapa, permaneciendo unidos a ésta solamente en una estrecha zona, por la cual se elevan como si se tratara de una bisagra.

* La zona donde se producen los mayores adelgazamientos, se da en la pared a unos 16 mm de su parte superior. Cada 90° se observa una zona de estas más críticas.

Se considera que en cuanto a trabajos futuros, quizás el principal de ellos sería averiguar por qué esta versión de Autoform no guarda correspondencia con los resultados de los ensayos reales. Se cree que el trabajo restante sería un trabajo más informático o de programación donde quizás se deberían revisar las ecuaciones que rigen la simulación.

6. Bibliografía

[1] Carlos P. Garrido, Diego J. Celentano, José A. Castillo, José M. Guerra. “*Simulación del proceso de embutición de una tapa de embrague de una lavadora semiautomática*”. Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería Mecánica.

[2] Daniel Barrientos Carrera, Eusebio de la Fuente López, Félix Miguel Trespaderne. “*Detección de fallos en piezas de embutición mediante inspección visual automática*”. ETSII Universidad de Valladolid

[3] Eulogio Santos De La Cruz. “*El proceso de embutición*”.

[4] Irving Shames. “Introducción a la mecánica de sólidos”.

[5] Alfredo Saenz y A.O. Lucaioli. “Elementos de teoría de plasticidad, principios fundamentales”.

[6] Stuart Keeler. “La Ciencia del Formado. Resolviendo problemas en el embutido de copas”.

[7] Jack Hu, Zdzislaw Marciniak, John Duncan. “*Mechanics of Sheet Metal Forming*”

[8] Ing. Koyu Shimizu. “*Conocimientos Prácticos de las Herramientas de Embutido*”. Proyecto de mejora de tecnología de estampado y troquelado.

[9] Fabian Campos, Marco A. Bejar. “*Formado por deformación en láminas metálicas por el proceso de embutido profundo*”. Ingeniería mecánica. Facultad de Ciencias y Matemáticas. Universidad de Chile

[10] Nakajima, K., Kikuma, T. and Hasuka, K. “*Study on the formability of steel sheets*”. Yawata Technical Report. Vol. 264, 1968, p. 8517-8530.

[11] Ramaekers, J.A.H and Bongaerts, P.C.P. “*A note on the Forming Limit Curve*”. Shemet Belfast. 1994, p. 30.50.

[12] Banabic, D., Bunje, H.J., Pöhlndt, K. And Tekkaya, A.E. “*Formability of Metallic Materials*”. Springer-Verlag. 2000.

[13] Lenin Santiago Carate Caguana, Darwin Stalin Gallardo Parra. “Análisis del proceso de embutición profunda para la elaboración de recipientes cilíndricos de pared delgada por medio del software Stampack”. Escuela Politécnica Nacional de Quito

[14] Bleck, W., Deng, Z., Papamantellos, K. and Gusek, C.O. “A comparative study of the forming-limit diagram models for sheet steels. *Journal of Materials*”. Processing Technolgy. Vol. 83, 1998, pags. 223-230.

[15] Raghavan, K.S. “A simple technique to generate in-plane forming limit curves absselected applications”. Metallurgical and Materials Transactions A. Vol. 26A, 1995, pags. 2075-2084.

[16] Chen, P. and Gerdeen, J.C. “Bending effects on forming limit diagrams for anisotropic sheets. Forming Limits Diagrams: Concepts, Methods and Applications”. TMS-AIME. 1989.

[17] Cisneros, J.C., et al, "*Optimization of Die Design in the Deep Drawing Process by means of Simulation*", Memorias del IV Intemational Materials Symposium- A Materials Science Forum, Porto Portugal, 1-4 April2007.

[18] R.Padmanabhan, M.C.Oliveira, J.L.Alves L.F.Menezes. “*Influence of parameters on the depp drawing of stainless steel* ", CEMEUC, Departament of Mechanical Engineering, University of Coimbra,Polo II, Pinhal de Marrocos.303-201 Coimbra,Portugal. , Departament of Mechanical Engineering, University of Minho, campus de Azurém.4800-058Guimaraes.Portugal. 23 July 2007

Anexo A. Formulación del problema

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES DE EMBUTICIÓN EN COPA CILÍNDRICA SOBRE CHAPA DC03

Estudiante:

Victor Cásedas Tejada (538233)

Director:

Emilio Royo Vázquez

Antecedentes

La embutición de chapas metálicas es uno de los procedimientos más comunes de elaboración de piezas para diversas aplicaciones, que van desde el hogar, hasta la industria en general. Es el proceso ideal para la fabricación de piezas en chapa fina con superficies complejas y altas exigencias dimensionales. Éste se realiza de todos los tamaños. A pesar de esta diferencia de dimensiones, los embutidos de copa siguen el mismo método de conformado y están definidos por los mismos factores o parámetros. Diferentes investigadores han profundizado en la influencia de distintos factores para diferentes materiales.

Objetivo

El presente trabajo pretende el análisis de cómo responde el adelgazamiento de la chapa ante la variación de distintos factores de control, cuyos rasgos corresponden a un caso práctico del sector de electrodomésticos.

Contenido

En primer lugar contiene un análisis del estado del arte, consultando bibliografía especializada y artículos de investigación. A partir de este análisis se prepara un Diseño de Experimentos, el cual se desarrolla mediante simulación por elementos finitos y posteriormente mediante ensayos en prensa. Los parámetros elegidos principalmente para este proyecto son: Radio de la matriz, Radio del punzón, holgura, razón límite de embutición (RLE) y fuerza de pisado (BHF), con función de estudio el adelgazamiento en la zona más crítica. Al final se comparan los resultados obtenidos en las simulaciones con las piezas de copa cilíndrica reales.

Victor Cásedas Tejada - MSM

Anexo B. Estudio bibliográfico

B.1 El proceso de embutición

B1.1 Definiciones del proceso

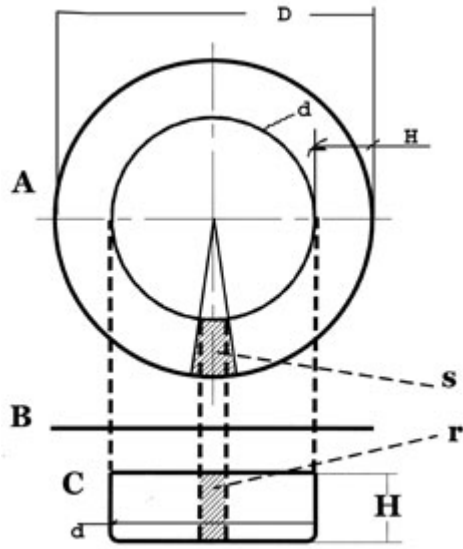
1. Se trata de un proceso de conformación en frío de chapas planas en cuerpos con cavidades, mediante una combinación de fuerzas de tracción y compresión, que se traducen en un flujo del material.
2. Se puede decir que la embutición consiste en obtener una pieza hueca de superficie no desarrollable, partiendo de un recorte sin que varíe el espesor de la chapa.



3. También se puede decir que entendemos por embutición, la operación con la que se transforma una pieza de chapa plana, en un cuerpo hueco, aprovechando las cualidades plásticas de los materiales, procediendo para conseguirlo, en una o varias fases o pasadas del disco origen por la matriz de embutir, embutidor o estampa.



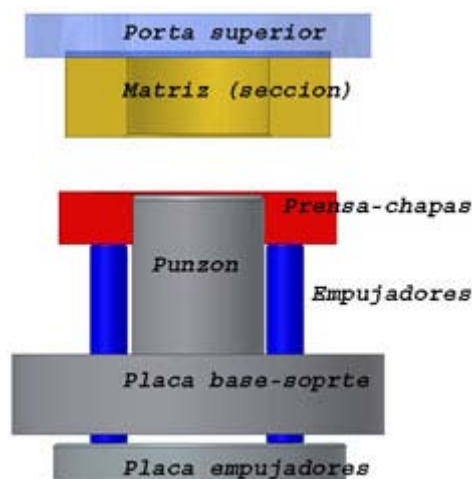
B1.2 Desarrollo del proceso



Supongamos que del disco $A = B$ (visto de canto), sacamos la cubeta C . Supongamos que la transformación se ha producido a espesor constante. El fondo de diámetro d , no ha sufrido ninguna transformación; por el contrario, la corona circular delimitada por los diámetros $D - d$, que dará paso a la altura de la parte cilíndrica de la pieza embutida, si que ha variado, pasando su sección s , de forma trapezoidal, a la sección r con forma rectangular. Para éste cambio de forma, se habrán producido unos esfuerzos radiales de tracción y otros tangenciales de compresión.

A éstos esfuerzos de compresión, se deben principalmente los pliegues que se pueden producir en la parte de la corona circular que todavía no se ha embutido; pliegues muy difíciles de eliminar. Para subsanar dicho inconveniente, colocaremos el pisador o placa Prensa-Chapas, que aprisionando el disco de chapa, entre el pisador y la placa matriz, impedirán la formación de los indeseables pliegues.

En esencia, el conjunto de embutición consta de los componentes que se muestran en la figura inferior:

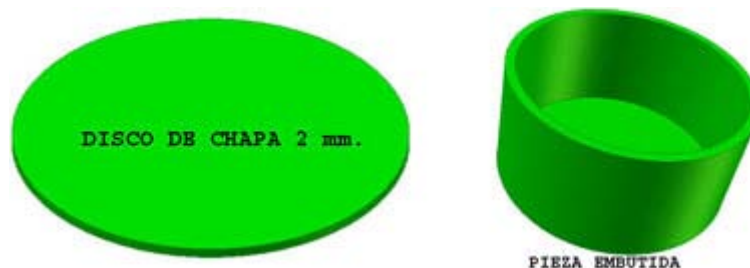


- Placa base-soporte, que es donde se apoya todo el conjunto de la matriz en la mesa de la prensa y en la que se inserta el punzón, con la forma interior de la

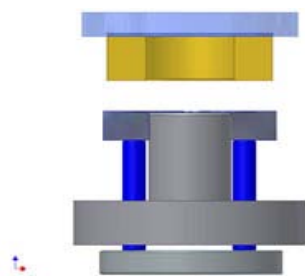
pieza a embutir. En ésta placa se mecanizan los orificios que darán paso a los empujadores.

- Empujadores, que son los pasadores que mantienen el pisador con la presión necesaria.
- La placa de empujadores, donde se apoyan los empujadores y que recibe la fuerza de accionamiento del cojín neumático o de los resortes elásticos.
- La placa prensa-chapas o pisador, que se desliza a lo largo del punzón cuando el disco va conformándose por el empuje de la placa matriz, siendo retenida la pieza por la presión de los empujadores. Ésta placa es de acero templado y rectificado, pero también puede llevar una banda de bronce en todo el contorno de rozamiento de la chapa a embutir cuando las piezas a obtener son de materiales que no deban presentar ningún tipo de rayas (acero inoxidable pulido). En dicha placa de retención mecanizaremos el dispositivo de centrar la chapa.
- Placa matriz, con la forma que deba tener la pieza exteriormente. El contorno de la figura se redondeará para facilitar el perfecto escurrido de la chapa. Dicho contorno se construirá de bronce en los casos comentados anteriormente.
- Sujetando a la placa matriz, tenemos el porta superior, que es por donde embridamos a la maza o parte móvil de la prensa.
- Por otro lado está el punzón o macho de conformación de la pieza a embutir. Como todas las piezas está fabricado de acero indeformable y su posterior tratamiento térmico adecuado, aun cuando para pequeñas series se construye de acero suave, ya que su trabajo es menor que el que realizan la matriz y el pisón. El canto del punzón, se redondea para evitar que raje las chapas en el proceso de conformado.

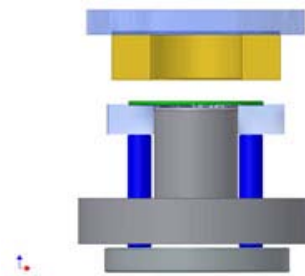
Para explicar el proceso, veamos la secuencia de embutición para obtener el capacete, a partir de un disco de chapa de 2 mm.



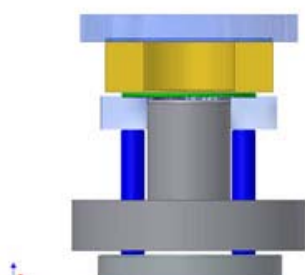
- Las fases de trabajo serán las siguientes:



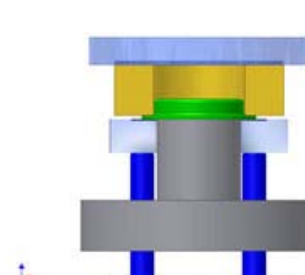
Estampa en reposo



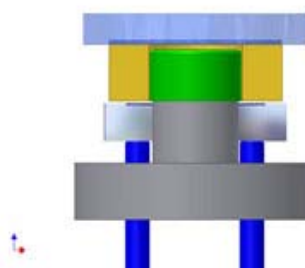
Colocación del disco



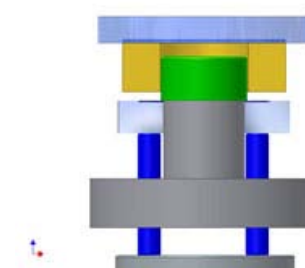
Retención del disco



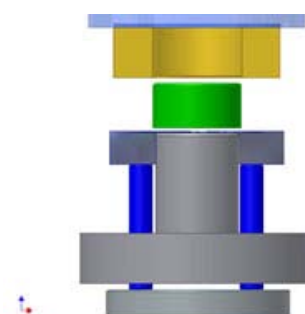
Embutiendo



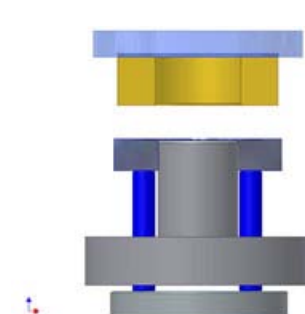
Embutido



Expulsando



Expulsado

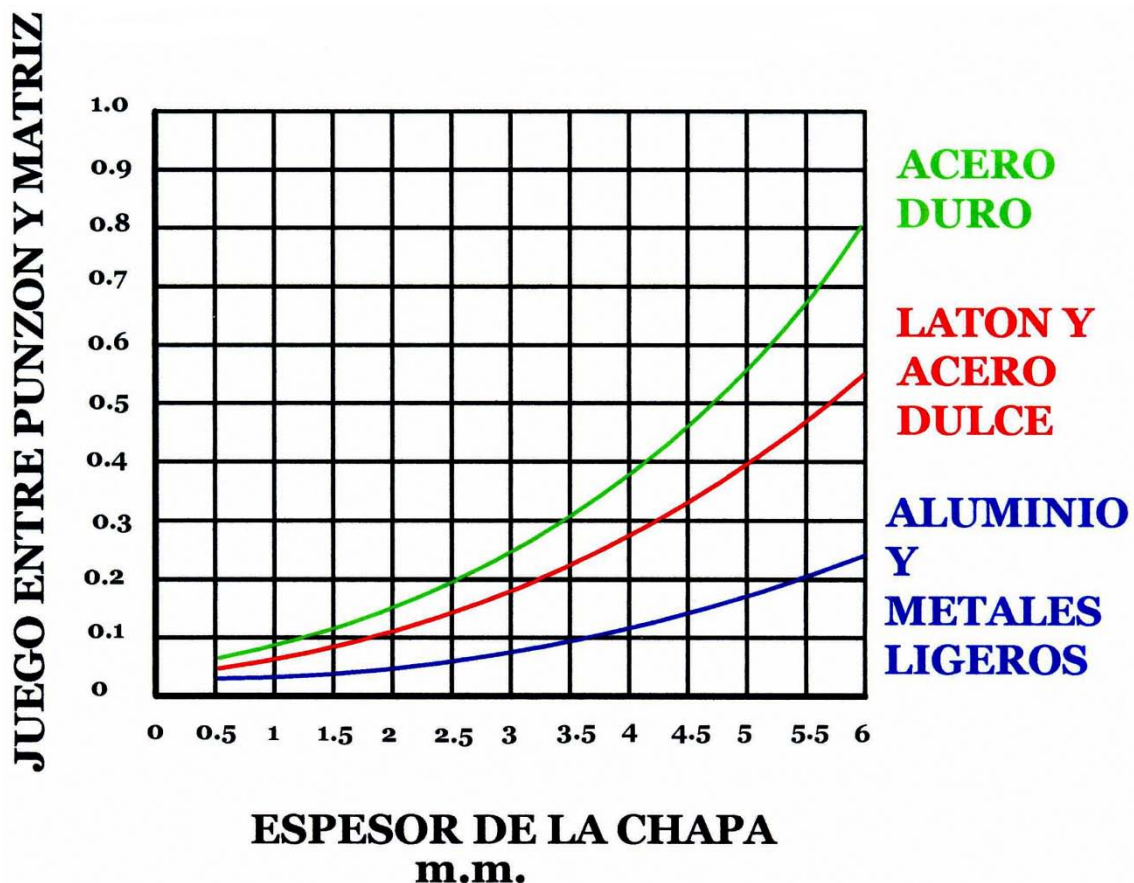


Reposo y reinicio

No obstante, para la embutición en general se imponen las prensas hidráulicas de doble y triple efecto, pero también hay que destacar la mayor utilización de prensas mecánicas en los trabajos de embutición de grandes series.

Cuando la embutición es profunda, no se puede lograr la obtención de piezas en una sola fase de embutido, sino que tenemos que realizarlo en varias etapas. Se puede conseguir en una sola operación aproximadamente, una profundidad de embutido igual a la mitad del diámetro en piezas pequeñas, y un tercio del diámetro, en piezas grandes. Cuando la profundidad es mayor, serán necesarias tantas operaciones como las veces que la profundidad sea mayor que el límite anteriormente citado.

También es de vital importancia tener en cuenta el juego entre matriz y punzón. Para ello ver tabla inferior.



B1.3 Prensas de embutición

Recibe el nombre de prensa a la máquina que es capaz de realizar un trabajo instantáneo y seco, proporcionado por la energía cedida por la inercia del volante, y que mediante un troquel, matriz, estampa, o embutidor, transforma una superficie plana metálica, en una pieza con perfil definido por el útil, o en un recipiente de volumen determinado por el embutidor.

El principio de funcionamiento de la prensa se basa en la teoría de Pascal, “toda presión aplicada a un fluido confinado se transmite sin reducción a todos los puntos del fluido y a las paredes que lo contienen” Un depósito con dos émbolos de distinta sección conectados a él permite amplificar la fuerza aplicada en el émbolo pequeño y además cambia la dirección de la fuerza aplicada. El punto de aplicación de las fuerzas debe estar situado sobre la sección de los émbolos.

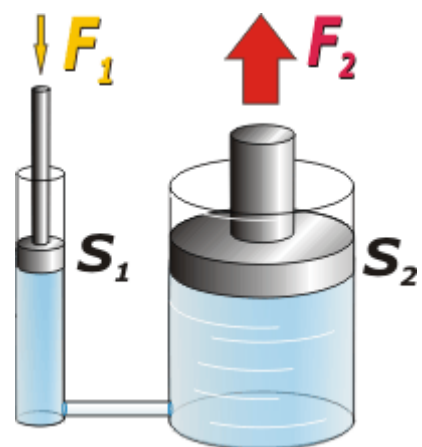
Los tipos de prensas más empleadas, se pueden resumir en:

* Prensas hidráulicas: mayores carreras, velocidad y fuerza controlada a lo largo de la carrera. Menor número de golpes por minuto. Empleadas principalmente para embutición profunda.

Así pues, el principio de Pascal tiene una aplicación práctica: la prensa hidráulica. Consiste en un recipiente cerrado con dos émbolos. Un émbolo es una superficie deslizante dentro de un tubo: un pistón. Uno de los émbolos es de sección pequeña (el 1) y el otro, grande (el 2).

Aplicando una fuerza, F_1 , sobre el émbolo pequeño, se obtiene una fuerza mayor, F_2 , en el émbolo mayor. O sea: la prensa hidráulica es un multiplicador de fuerzas. La explicación de su funcionamiento es sencillísima.

Pongamos los dos émbolos a la misma altura. Entonces, por aplicación del principio general de la hidrostática, garantizamos que entre los émbolos no habrá diferencia de presión. Luego aplicamos una fuerza de intensidad F_1 en el émbolo 1. La fuerza F_1 se reparte en un área pequeña, S_1 . Queda entonces definida la presión P_1 .



Pascal, a su vez, garantiza que en el otro émbolo la presión será la misma. O sea:

$$P_1 = P_2$$

$$F_1 / S_1 = F_2 / S_2$$

la que a nosotros nos interesa es

$$F_2 = F_1 \cdot (S_2 / S_1)$$

De modo que la fuerza resultante F_2 , será (S_2 / S_1) veces mayor que F_1 . Cuanto más grande sea la sección del émbolo grande respecto de la sección del émbolo finito mayor va a ser el factor de multiplicación de la fuerza. Por ejemplo, si la sección 2 es 100 veces mayor que la sección 1 (una relación típica), entonces la fuerza 2 es 100 veces más grande que la 1.



Prensa hidráulica de cuello de cisne

* Prensas mecánicas: Carreras cortas, fuerza máxima en un momento de la carrera y mayor capacidad de proceso. Empleadas principalmente para corte, plegado...



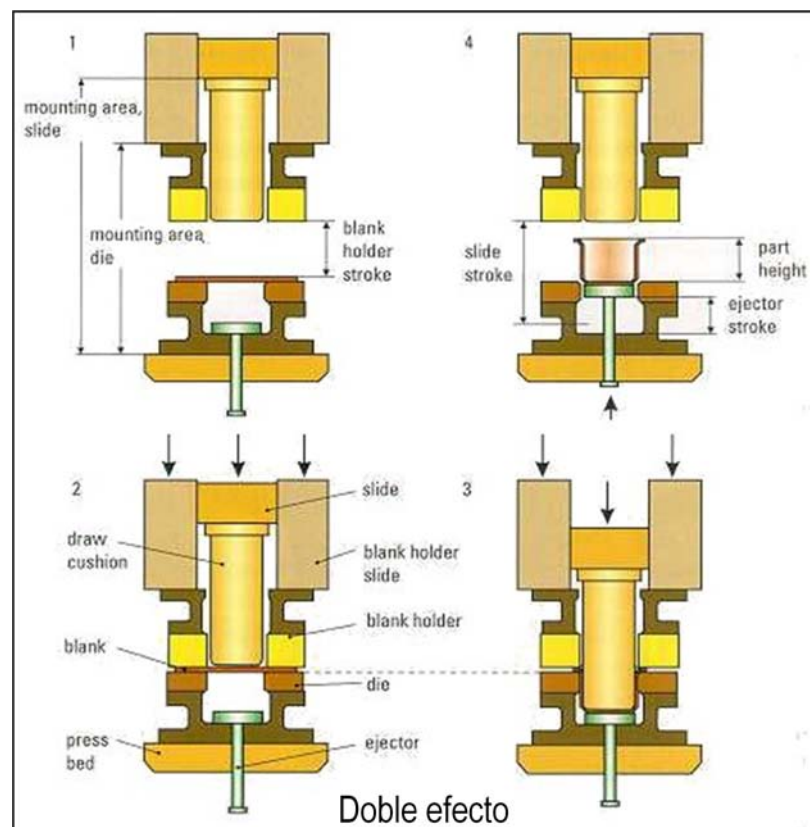
B1.3.1. Tipos prensas hidráulicas

Las prensas Hidráulicas se destinan principalmente a la embutición, y también para el retoque de grande estampas. Pueden ser de simple, doble y triple efecto, cuando van dotadas de cojín neumático o hidráulico.

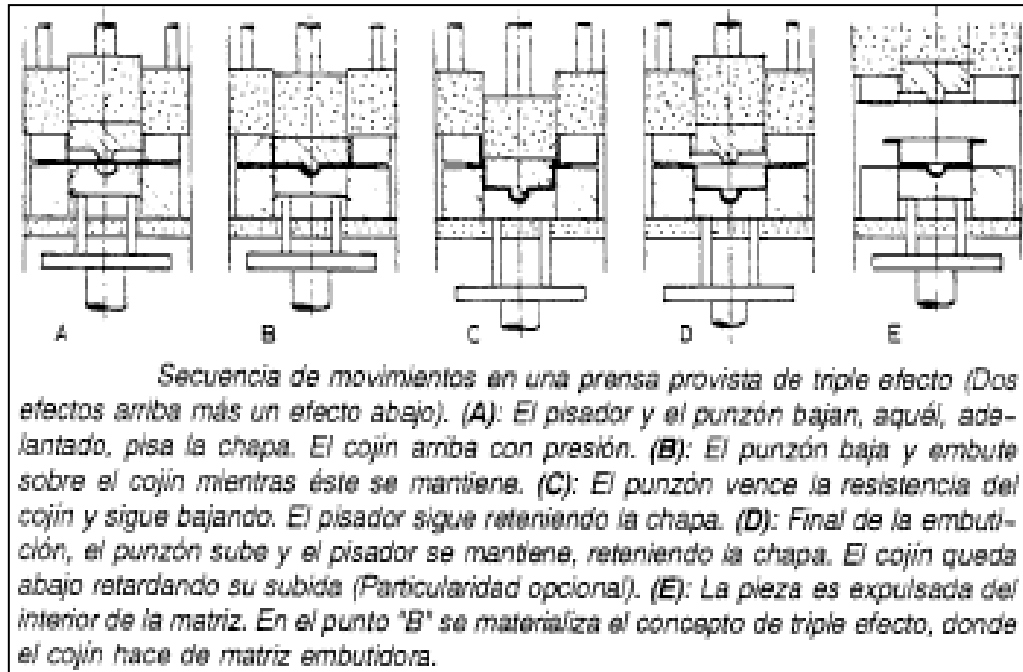
Actualmente todas las prensas llevan de serie, sistemas de protección mecánica, electrónica y también con barreras ópticas para la seguridad del personal que las manipula.

- *Simple efecto:* Uso de cojín para controlar la fuerza del pisador durante la carrera del carro
- En primeras estaciones de conformación de líneas de prensas de automoción. 1,2,4 ó 6 puntos de aplicación; de 90 a 220 Tm por cilindro; una válvula proporcional por cilindro.
- Fuerza del pisador constante
- Fuerza variable
 - En diferentes posiciones: cojines independientes
 - Elevada en tramos rectos para reducir el flujo del material y evitar arrugas

- Baja en esquinas para facilitar el flujo del material y reducir adelgazamiento
- A lo largo de la carrera:
 - Elevada al principio para evitar arrugas
 - Baja al final para reducir adelgazamiento
- *Doble efecto*: Trabajos de embutido profundo
- Dos efectos arriba // Un efecto arriba y otro abajo
- Tiene dos arietes deslizando uno exteriormente y otro en el interior. En el ariete exterior se monta generalmente el pisador y es actuado por medio de brazos articulados o de levas excéntricas, de manera que al final de su carrera permanece estacionario y aplicando presión para sujetar la pieza. El ariete interior o punzón sigue su movimiento hacia arriba simultáneamente.

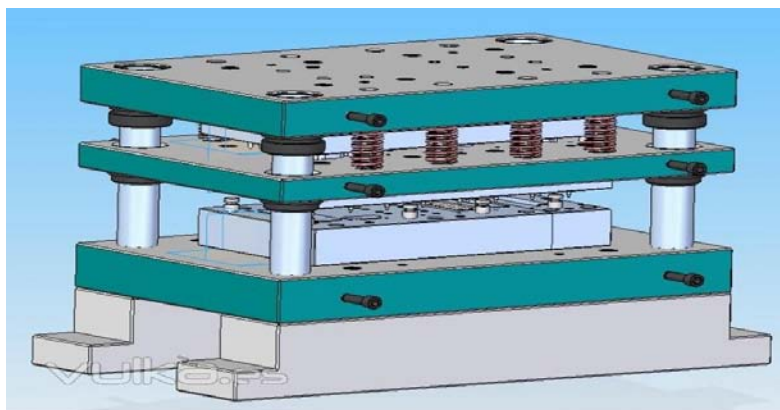


- *Triple efecto*: Muy semejantes en principio a las de doble efecto, pero tienen un ariete adicional que trabaja de abajo hacia arriba, cuyo movimiento se sincroniza con el de los dos arietes anteriores



B1.4 Troquel

Se le llama troquel a la herramienta que da forma a materiales sólidos, y en especial para el estampado de metales en frío. Va montada en una prensa y permite realizar operaciones diversas tales como embutido, doblado, cizallado etc



Los troqueles pueden ser de tres tipos:

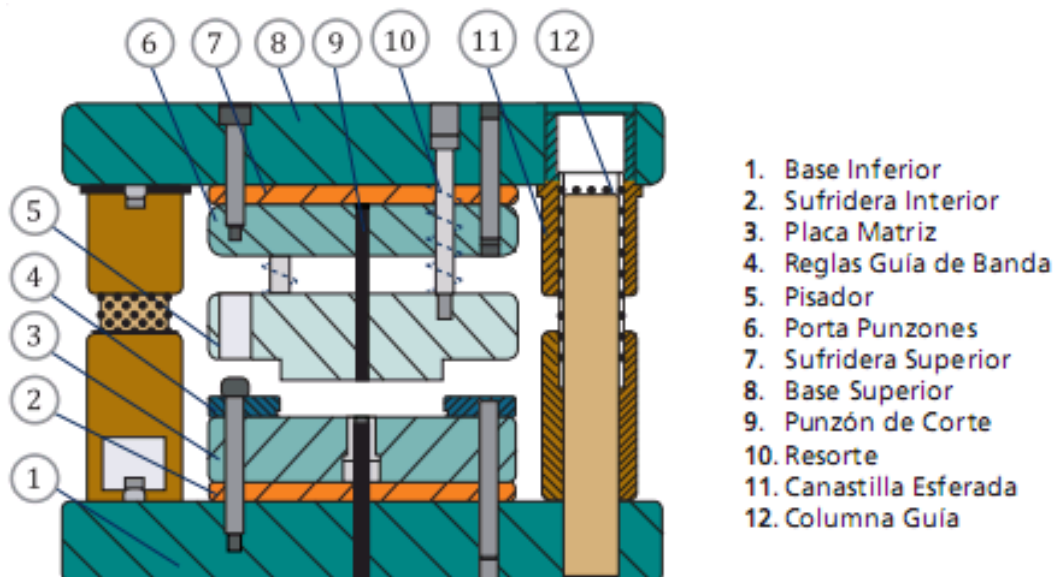
- *Simples*: estos troqueles permiten realizar solamente una operación en cada golpe del ariete o carnero, son de baja productividad y normalmente es necesario el uso de otros troqueles para poder concluir una pieza y considerarla terminada.
- *Compuestos*: estas herramientas permiten aprovechar la fuerza ejercida por el ariete realizando dos o más operaciones en cada golpe y agilizando así el proceso.
- *Progresivos*: estos troqueles constan de diferentes etapas o pasos, cada uno de ellos modifica el material en una determinada secuencia establecida por el diseñador (secuencia de corte), de tal manera que al final se obtiene una pieza o piezas terminadas. Son altamente productivos aunque su mantenimiento y operación es más compleja que en los anteriores y requiere mayor capacitación del personal involucrado.

Se trata de un solo útil para transformar una banda en piezas pequeñas (menor de 500 mm) a altos ritmos de producción y grandes volúmenes de producción (más de 500000 piezas al año)



Requieren un mantenimiento regular para asegurar la calidad de los componentes que producen. Normalmente los servicios de mantenimiento consisten en afilar los cantos de golpes, en sustitución de las piezas rotas y dañadas. Con los procesos de mantenimiento preventivo se alarga la vida de servicio del troquel.

A continuación se describe las partes que están presentes en casi todas las matrices progresivas, independientemente de su tamaño.



Base inferior (1): es el elemento sobre el cual van montados todos los componentes que hacen parte de la matriz, y a su vez, está sujeta fuertemente en la bancada de la prensa durante la fase de trabajo. Esta base y los elementos que lleva montados hacen las funciones de apoyo. En la base inferior también se pueden montar las columnas guía que sirven como referencia de centrado entre la parte superior e inferior. Algunos de los elementos que aloja la base inferior son: placa porta matrices, reglas guías, sufridera inferior, topos de avances, columnas guía, pernos, etc.

Sufrideras (2,7): la función básica consiste en absorber sobre su superficie los sucesivos golpes de los elementos en el troquel. Estos impactos se producen cada vez que los punzones transforman la lámina con la matriz. Cuando el punzón impacta contra el material, la resistencia que opone éste es transmitida a la superficie de las sufrideras sobre las que se apoyan las placas porta matriz y porta punzones.

Porta matriz (3): o cajera tiene por misión alojar y posicionar en su interior todos los elementos de pequeñas dimensiones que lleve la propia matriz, de esta manera dichos componentes quedarán ajustados en su interior.

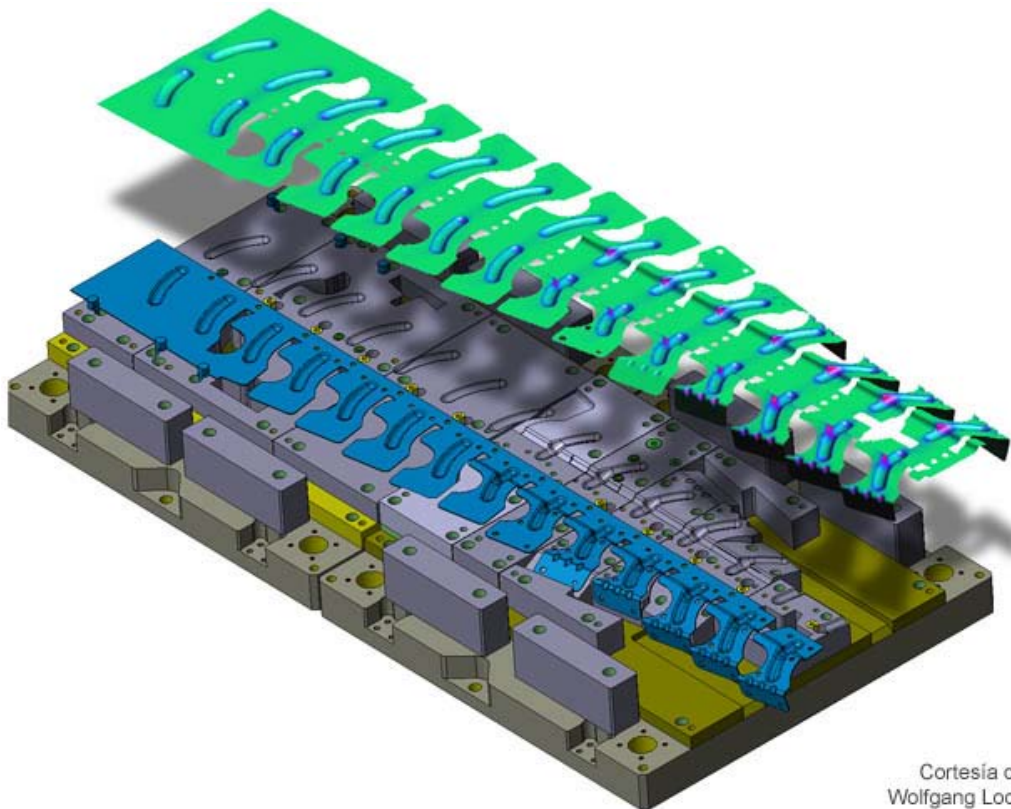
Reglas guías (4): son uno de los componentes más característicos de las matrices progresivas. Se disponen con el fin de guiar longitudinal y transversalmente las tiras de lámina en su desplazamiento por el interior de la matriz.

Pisador (5): durante el movimiento descendente del troquel, la placa pisadora presiona la lámina dejándola inmovilizada antes de que los punzones lleguen a tocarla y mientras penetran el material y lo transforman.

Porta punzones (6): la finalidad es la de alojar y fijar en su interior todos los punzones que lleve la matriz. Estos punzones pueden ser de cualquier tipo o tamaño pero han de tener una sola característica en común: estar firmemente sujetos y guiados en el interior de dicha placa impidiendo que puedan moverse o desprenderse.

Base superior (8): tiene la misión de contener en su superficie todas las placas y elementos que sostienen los punzones del troquel, está anclada al ariete de la prensa, que la inmoviliza y fija durante todo el proceso de trabajo. Ésta conduce el movimiento de la máquina para que los punzones penetren la matriz y transformen la lámina. Algunos de los elementos que aloja la base superior son: placa porta punzones, sufridera superior, bujes guías, placa pisadora, resortes, entre otros.

Pilotos centradores: son elementos que sirven para centrar los troqueles con la lámina y garantizar un desplazamiento correcto entre cada uno de los pasos que realiza la banda. De no ser así se podrían perder los puntos de referencia en común que tendrían las diversas transformaciones y con ello generar desplazamientos del material que ocasionarían irregularidades o defectos en las piezas. Generalmente van montados en la placa porta punzones y ajustan en agujeros de la lámina.



Cortesía de
Wolfgang Loch

B1.5 Capacidad embutido profundo

En una operación de embutición profunda, la generación de defectos suele deberse al adelgazamiento de la pared de la depresión debido a los grandes esfuerzos longitudinales de tensión. Si se sigue el movimiento del material hacia la cavidad del dado, se puede ver que la lámina metálica debe ser capaz de sufrir una reducción de ancho, a causa de la reducción de diámetro; además, la lámina debe resistir el adelgazamiento bajo los esfuerzos de tensión en la pared de la pared de la taza. La capacidad de embutición profunda se mide, en general, con la relación límite de embutido (RLE):

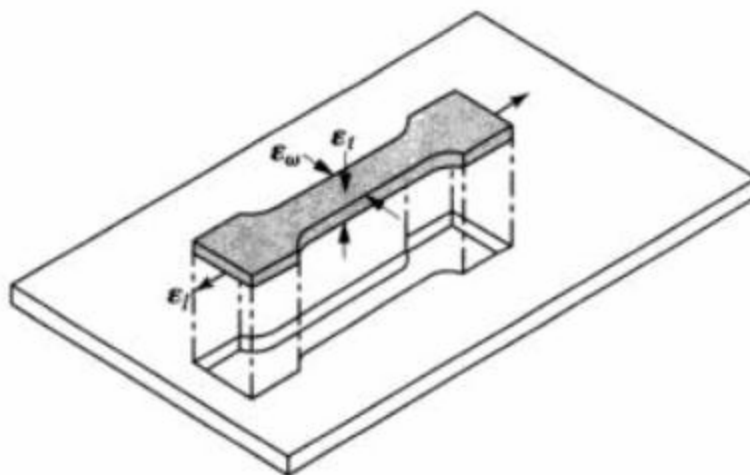
$$RLE = D_o / D_p$$

Donde, D_o corresponde al diámetro máximo de lámina bruta y D_p al diámetro del punzón.

El que una lámina se pueda embutir en forma profunda para crear una taza redonda es función de la anisotropía normal, R , del metal laminado, que también se llama anisotropía plástica. La anisotropía normal se define en función de las deformaciones reales que sufre muestra a la tensión (Figura 4):

$$R = \varepsilon_w / \varepsilon_t$$

Donde ε_w es la deformación en ancho y ε_t la deformación en espesor.



Deformaciones en un ensayo de tensión, sacado de una pieza de lámina metálica. Estas deformaciones se usan para determinar la anisotropía normal y plana del metal laminado.

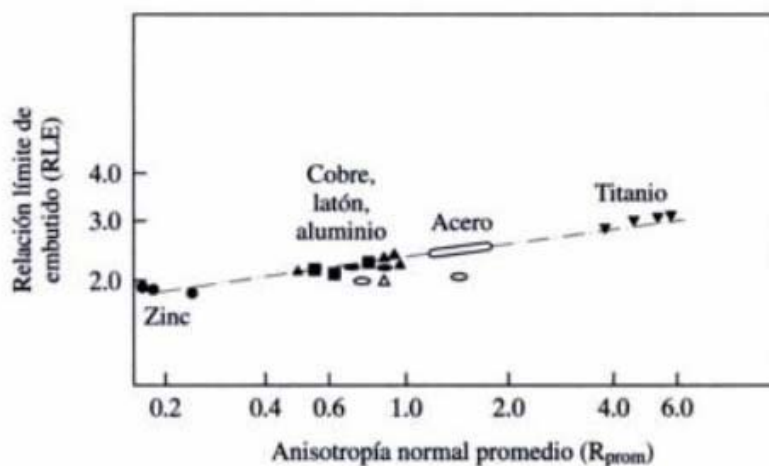
Para calcular el valor de R se prepara primero una muestra para la prueba de tensión y, a continuación, se le somete a una elongación del quince al veinte por ciento. Como casi siempre las hojas láminas en frío tienen anisotropía en su dirección planar, el valor de R de una muestra cortada de una lámina rollada dependerá de su orientación con respecto a la dirección de laminado de la hoja (o lámina). En este caso, se calcula un valor promedio (R_m) con la siguiente ecuación:

$$R_{prom} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4}$$

Los subíndices de R indican los ángulos son respecto a la dirección de laminación de la hoja. En la siguiente tabla se ven valores característicos de R_{prom} .

Aleaciones de zinc	0.4–0.6
Acero laminado en caliente	0.8–1.0
Acero laminado en frío-acero efervescente	1.0–1.4
Aluminio laminado en frío-acero calmado	1.4–1.8
Aleaciones de aluminio	0.6–0.8
Cobre y latón	0.6–0.9
Aleaciones de titanio (α)	3.0–5.0
Aceros inoxidables	0.9–1.2
Aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA, High-strength, low-alloy)	0.9–1.2

La relación experimental entre R_{prom} y la relación límite de embutido se ve en la siguiente imagen. Ninguna otra propiedad mecánica del metal laminado muestra una dependencia tan consistente respecto a la RLE como R_{prom} . Así, mediante el resultado de una prueba de tensión y el cálculo de la anisotropía normal de la lámina metálica, se puede determinar la relación límite de embutido de un material.



B 1.5.1 Anisotropía planar

En la embutición las orillas o bordes de las depresiones se pueden volver onduladas; a este fenómeno se le denomina borde ondulado u orejas. Esta condición se debe a la anisotropía planar de la hoja. Se define en términos de valores direccionales de R , con la ecuación:

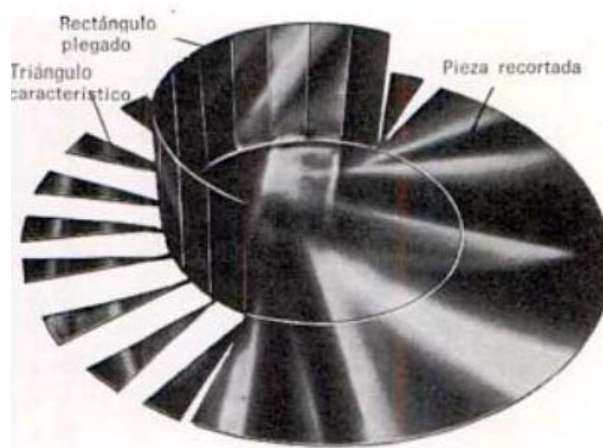
$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2}$$

Cuando $\Delta R = 0$ no se forman orejas. La altura de éstas aumenta al incrementar ΔR . La cantidad de ondulaciones que se forman puede ser dos, cuatro u ocho. Las orejas son indeseables en las depresiones embutidas, porque hay que recortarlas y se producen mermas.

Se puede ver que la capacidad de embutición profunda aumenta con un valor alto de R_{prom} y bajo de ΔR . Sin embargo y en general, los metales laminados con R_{prom} alto también tienen valores altos de ΔR . Se están desarrollando texturas de metal laminado para mejorar la capacidad de embutición controlando el tipo de los elementos aleantes en el material, al igual que diversos parámetros del proceso durante el laminado de la hoja.

B 1.6 Esfuerzos producidos en el material

Para interpretar mejor los esfuerzos generados en una pieza, nos imaginamos una superficie compuesta por muchos rectángulos doblados hacia arriba en ángulo recto respecto al fondo, quedan entonces en el recorte utilizado otros triángulos sobrantes.

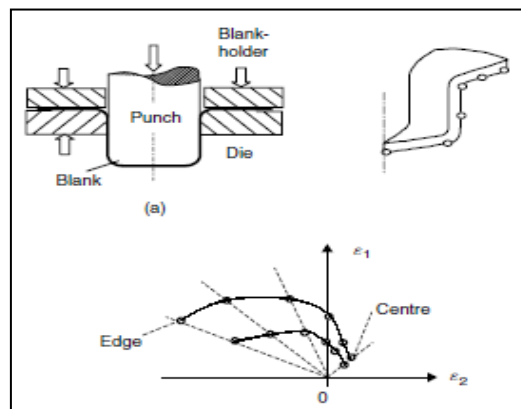


El material de estos triángulos se transformará con la embutición en pliegues. Como el dispositivo sujetador se lo impide y no puede desviarse hacia ningún lado, la chapa se ve recalada entre el dispositivo sujetador y la matriz de embutición. A medida que avanza la embutición este material es extendido, entre el punzón y la matriz. Con esto resulta que el contenido superficial de la pared lateral aumenta en el contenido superficial de los triángulos, es decir que la pieza embutida resulta más alta que los lados longitudinales de los rectángulos doblados hacia arriba.

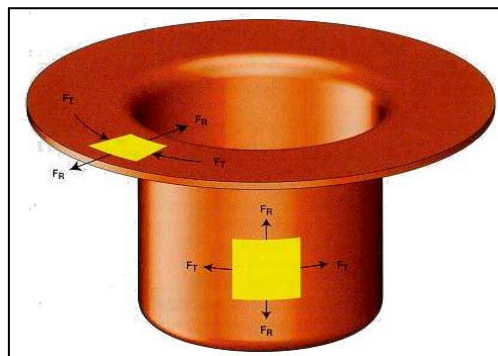
Los materiales susceptibles de ser sometidos a la embutición tienen que permitir esta deformación sin romperse, han de poseer un gran alargamiento y resistencia a la tracción. La deformación exigible incluso al mejor material para embutición es limitada. Por esta razón las piezas cuya altura en relación con su diámetro, o bien su longitud y respecto a su anchura, es grande tendrán que embutirse en varias fases.

Centrándonos en la embutición en copa cilíndrica, podemos decir que hay tres zonas de deformación:

- Ala (zona del pisador): estado de embutición pura.
 - Al entrar el punzón, el material se desplaza, provocando una tracción axial. Al disminuir el diámetro del ala, se produce una compresión circunferencial, lo que implica posibles pandeos, arrugas y pliegues e incremento del espesor. De aquí la necesidad del pisador.
 - Esfuerzos de compresión en dirección del espesor

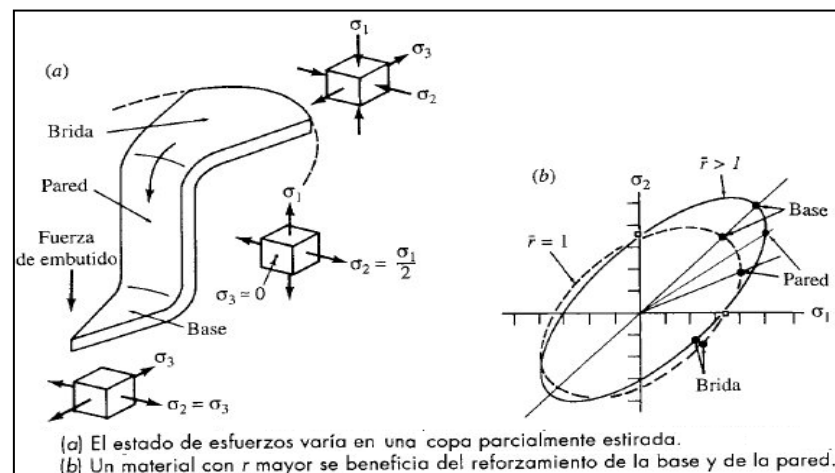


- Pared: estado de tracción biaxial
 - Alargamiento del material, con reducción del espesor
 - Tracción en la dirección generatriz; Tracción en dirección circunferencial ya que el conjunto punzón matriz impide la contracción circunferencial;
 - Compresión en dirección del espesor sólo si el juego es menor que el espesor



- Base: estado de tracción biaxial pura y equilibrada
 - En el radio del punzón es donde se reduce más el espesor.
 - En el fondo existe un pequeño alargamiento en sentidos radial y tangencial, así como disminución del espesor

Observar imagen contigua, la cual representa lo comentado en los tres puntos anteriores



Importancia también de la textura cristalográfica. Interesa alta anisotropía normal (reforzamiento de base y pared) y nula anisotropía planar (evitar arrugas en el ala)

$$\bar{r} = \frac{r_{00^0} + r_{90^0} + 2 r_{45^0}}{4} \quad \Delta \bar{r} = \frac{r_{00^0} + r_{90^0} - 2 r_{45^0}}{2}$$

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad \bar{n} = \frac{n_{00^0} + n_{90^0} + 2 n_{45^0}}{4}$$

B 1.7 Defectos en la embutición

El embutido es una operación más compleja que el corte o el doblado de lámina, por tanto hay más cosas que pueden fallar, por este motivo pueden presentarse numerosos defectos en un producto embutido. A continuación se describen muchos de ellos:

- **RETROCESO ELÁSTICO Y FORMACIÓN DE ARRUGAS**

Del mismo modo que en la operación de curvado, también en la de embutición se aprecia el efecto del retroceso elástico. Mientras que en el curvado, las condiciones de tensión presentan un carácter biaxial, en la embutición aparece una tercera magnitud correspondiente a la reducción del diámetro. En piezas que son simétricas respecto a un eje, la determinación de este factor es más sencilla que en piezas no simétricas, por ejemplo, las de carrocería, en donde las variaciones en las dimensiones originadas por el efecto de retroceso elástico son especialmente molestas debido a que estas piezas han de poder adaptarse entre sí. Las piezas que al ser embutidas sufren un adelgazamiento de sus paredes no muestran este efecto de retroceso o reacción elástica.

- **DIFERENCIAS DE ESPESOR EN LA CHAPA**

Las roturas debidas a un espesor desigual en la chapa aparecen principalmente en piezas no cilíndricas. Teniendo en cuenta la dirección de laminado, si las roturas aparecen en dirección paralela a la dirección de laminación, la mayoría de las veces indica que la pieza no es apropiada para ser embutida, pero, si en varias piezas no se observa influencia alguna de la dirección de laminación con respecto a la situación de las roturas y éstas están dispuestas en forma radial en las zonas más gruesas de la brida de la chapa, puede afirmarse que el origen del defecto está en el espesor desigual de la chapa.

- **DEFECTOS PRESENTADOS POR LA CHAPA**

La aparición de tales defectos ocurre muy rara vez. Se detectan fácilmente en aquellas zonas en donde la pieza ha sufrido pocas sollicitaciones con la embutición y, a pesar de ello, aparece una rotura. Entran en este grupo los defectos originados por la introducción de cuerpos extraños durante la operación de laminación, o durante el embutido al fluir el material por encima de la arista de embutición.

Los agujeros y grietas de pequeñas dimensiones quedan a menudo rellenados por el material durante la embutición.

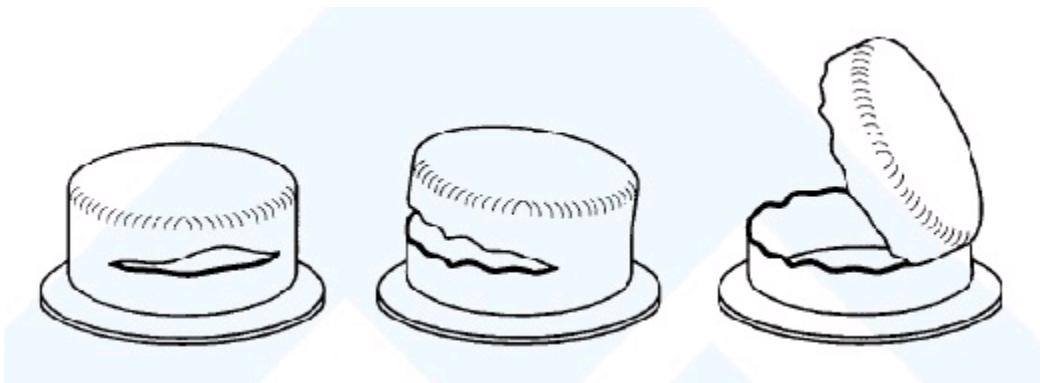
- CHAPA DE POCA CALIDAD

Las chapas de poca calidad no pueden embutirse correctamente aunque la gradación se haya determinado correctamente. La señal característica de que la calidad no es la adecuada consiste en la formación de fisuras en la dirección de laminación y la aparición de sinuosidades.

Se adopta como un criterio más para determinar la idoneidad de la chapa para ser embutida, el aspecto del grano de la zona que rodea a la fisura en lo que concierne a su grado de finura. El grano grueso en dicha zona, indica que la chapa es menos apropiada para una operación de embutición que las chapas que presentan un grano fino. Sin embargo, existen excepciones puesto que existen chapas de acero que, a pesar de presentar una superficie áspera, son muy apropiadas para ser embutidas.

- GRADACIÓN EXCESIVA EN LAS EMBUTICIONES

El escalonado de embutición excesivamente grande en relación con la facilidad de embutición de un material, es un motivo de aparición de roturas en piezas embutidas.



Estas roturas se deben a un valor excesivo de la gradación de embutición. Los fondos se rompen, ya antes de formarse la pared lateral, en la zona muy próxima a la brida de la chapa, permaneciendo unidos a ésta solamente en una estrecha zona, por la cual se elevan como si se tratara de una bisagra, de manera que exteriormente adoptan la forma de una hoja. Por el contrario, las piezas que salen defectuosas al producirse roturas en embuticiones sucesivas, debidas a que se ha elegido un material que no es adecuado o un escalonado de embuticiones demasiado grande, son notablemente distintas entre sí.

- ALABEOS O ABOMBAMIENTO

En una operación típica de estampación, el punzón se pone en contacto con la chapa, esta se alarga y comienza a desplazarse por debajo del pisador. Los márgenes de la chapa se van introduciendo en zonas con perímetros que cada vez se van haciendo más pequeños. Esto produce tensiones compresivas en la dirección circunferencial. Si estas tensiones llegan a un nivel crítico característico del material y de su espesor, provocan pequeñas ondulaciones. Estas pequeñas ondulaciones pueden desarrollarse en ondulaciones más grandes si la presión del pisador no es suficientemente alta.

Este efecto puede causar también arrugas en otros sitios, particularmente en regiones con cambios de sección bruscos o en regiones donde la chapa solamente está sujeta o en contacto con una cara. En casos extremos, se pueden formar dobles y triples arrugas que pueden llevar a romper la chapa por otros lugares debido a la falta de flujo de material. Por esta razón, a menudo incrementar la presión del pisador puede corregir problemas de rupturas.

El borde de la embutición está agrietado en toda su extensión: en pliegues sobre la parte cilíndrica o labios sobre el borde.

Soluciones:

Reducir el juego entre el punzón y la matriz.

Reducir el radio de embutición.

Aumentar la presión del sujetador.



- DISTORSIÓN DE FORMA

En las operaciones de deformación, la chapa es deformada elástica y plásticamente debido a la aplicación de fuerzas. Cuando las fuerzas exteriores se dejan de aplicar, hay una relajación de las tensiones elásticas.

En algunas zonas, estas tensiones se relajan completamente con un ligero cambio de dimensiones de la pieza, en otras zonas sujetadas a flexión, el cambio de forma posterior puede ser más grande ya que existe un gradiente de las tensiones elásticas en el espesor, es decir, las tensiones entre las superficies exteriores e interiores son diferentes.

Si estas tensiones no son restringidas o fijadas por la geometría de la pieza, la relajación provocará un cambio en la forma de la pieza, conocida como distorsión de forma o recuperación elástica. La recuperación elástica puede ser compensada mediante un adecuado diseño de la matriz para un tipo específico de material, pero puede ser un problema si hay variaciones en las propiedades del material o del propio proceso.

Aspecto

- Formas indefinidas.
- Cambio de dimensiones.
- Recuperación elástica.
- Variaciones geométricas

- MATERIAL FLOJO

El material flojo sucede en zonas no deformadas. Este hecho resulta un problema porque puede provocar una fácil deformación hacia formas cóncavas o convexas indiferentemente. En estampaciones con dos o más ángulos pronunciados del mismo signo en aproximadamente la misma dirección, existe una tendencia del metal a quedar flojo entre los dos ángulos, ya que es difícil estirar un metal a través de un radio pronunciado.

Causas

Bombeado del fondo.

Mala evacuación del aire.



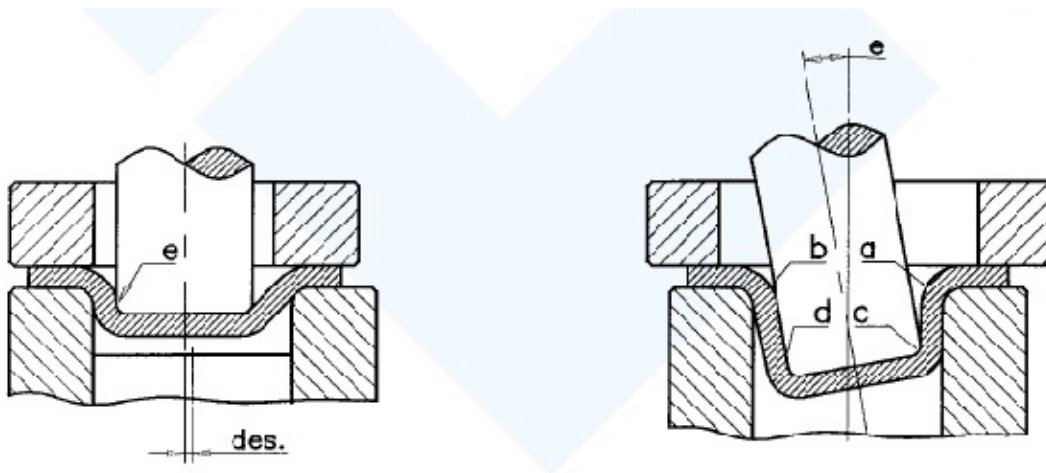
Victor Cásedas Tejada - MSM

- PUNZÓN DESCENTRADO O INCLINACIÓN DEL PUNZÓN

Las piezas embutidas se rompen por la zona más estrecha del hueco de embutición. Además, en la zona, que siempre queda frente a la tira de unión entre el fondo desgarrado y la brida de la chapa, pueden observarse huellas originadas por desigualdades de presión. Este inconveniente puede corregirse rápidamente desplazando el aro de embutición.

Más difícil de reconocer es el desplazamiento debido a la inclinación del punzón con respecto al aro de embutición.

Una característica de estas piezas rotas es el abombado de la parte de la pared lateral que une el fondo desgarrado con la brida de la chapa.



- TEXTURAS INADECUADAS

Las chapas de metal fuertemente deformadas, a menudo desarrollan una textura superficial áspera, conocida usualmente como piel de naranja. Estas superficies rugosas usualmente son inaceptables en piezas exteriores.

Otro tipo de problema sucede en metales que tienen una gran zona de fluencia, es decir, materiales que se estiran fácilmente sin grandes incrementos de carga después del límite elástico. En estos materiales, cuando tenemos pequeñas deformaciones, éstas se concentran en bandas irregulares conocidas como líneas de Lüders. Estos defectos desaparecen en moderadas y grandes deformaciones, no obstante, la mayoría de las piezas tienen siempre zonas de pequeñas deformaciones. Se trata de defectos que estéticamente no son agradables y que no pueden ser disimulados con una capa de pintura posterior. Los aceros viejos y algunas aleaciones de aluminio y de magnesio pueden sufrir estos problemas con facilidad.

Otros defectos superficiales pueden ser provocados por una incorrecta manipulación de las chapas que pueden originar marcas o señales causadas por la suciedad depositada sobre la matriz y estrías por abrasión de superficies rugosas de la matriz o por la inadecuada lubricación de éstas.

Todos estos defectos producen algunas superficies inadecuadas en las chapas

- **MARCAS DE EXPULSORES**

En las operaciones de embutición y curvado se utilizan, en mayor medida todavía que en las operaciones de corte, matrices con expulsor incorporado; estos aparatos, al descender el punzón, vencen la presión de un resorte y son empujados hacia abajo, mientras que, al subir el punzón, extraen la pieza curvada, expulsándola de la matriz.

La adaptación de este tipo de expulsores, principalmente en matrices para curvar, representa unos costes adicionales relativamente elevados.

Si, por el contrario, se han de colocar en una prensa gran número de matrices de curvar distintas disponiendo de cortos espacios de tiempo, con el fin de ahorrar, se recomienda montar tan sólo matrices que puedan accionarse por medio de un aparato expulsor situado debajo de la mesa.

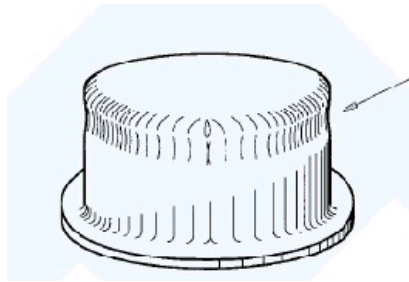
Soluciones

- Reducir la presión de los expulsores
- Aumentar la superficie de los expulsores



- **ESTRANGULAMIENTO ENCIMA DEL BORDE DEL FONDO**

En piezas embutidas de paredes gruesas y poco redondeado, en el fondo aparece un estrangulamiento alrededor de éste, (indicada con una flecha) que tiene relación con un pequeño debilitamiento de la pared en dicho lugar. Desde el punto de vista de la resistencia, esto no tiene importancia, puesto que tal debilitamiento es menor que el que experimenta el borde del fondo propiamente dicho, pero puede resultar perjudicial desde el punto de vista estético.



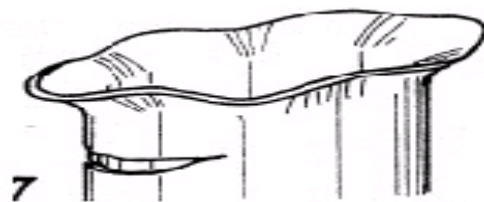
Puede evitarse este efecto dándole al redondeado del punzón, en vez de la forma de un arco de circunferencia, un perfil correspondiente a una catenaria, perfil que discurre progresivamente por la parte vertical del punzón.

- **FORMACIÓN DE SOPLADURAS EN EL CANTO Y EN LA PARED LATERAL**

Si la formación de sopladuras se reparte de forma distinta en varias piezas embutidas con la misma matriz, y si aparece con mayor intensidad cuando el engrase ha sido más generoso que cuando sea engrasado poco la herramienta, pueden corregirse tales inconvenientes mejorando la salida de desaireación. Pero si dichas sopladuras se presentan siempre en las mismas zonas del borde del fondo, independientemente del grado de lubricado, significa que la arista de embutición está desgastada.

A menudo se forman huellas de rascado dirigidas hacia el borde de la pared lateral y en la dirección de embutición; esto se observa en la parte exterior de una pieza embutida rectangular de gran tamaño.

El motivo de este fenómeno es la aparición de un desgarramiento del borde del fondo en el momento en que la pieza ha sido embutida hasta una profundidad.



- FORMACIÓN REGULAR DE SINUSOIDADES

Una señal que indica que una chapa es poco apta para la embutición, es la formación característica de sinuosidades en el borde de las piezas embutidas de chapas anisótropas. Se designan así, aquellas chapas que presentan anisotropía plástica, diferentes alargamientos, en las distintas direcciones del plano de la chapa.



La sinuosidad presenta cuatro crestas a 90° extendidas por el contorno del borde debido a esto, en piezas delgadas se recorta posteriormente el borde y en las piezas de pared gruesa, se tornea o rectifica.

- FORMACIÓN DE FLECOS EN EL BORDE LATERAL

Son tres las causas que motivan la aparición del defecto. Debido a una presión insuficiente del pisador y a un redondeado demasiado grande de la arista de embutición, se forman pliegues que se aplanan en el interior de la pared lateral, pero que, debido al aumento de espesor, no pueden continuar aplastándose hacia el borde superior de la pared, de modo que, al finalizar el prensado a través del aro de embutición, originan esfuerzos excesivos en la arista de embutición, los cuales, a menudo, causan daños.



B1.8 Otras operaciones/procesos de embutido

- EMBUTICIÓN SIN PISADOR

Con matrices normales de embutición, solamente puede embutirse sin pisador piezas que tengan poca profundidad de embutición, como por ejemplo, botes de crema o tapes de botes. La altura de la pared lateral h que puede conseguirse sin pisador es función del espesor de la chapa s y del diámetro de embutición d . Se cumple lo siguiente:

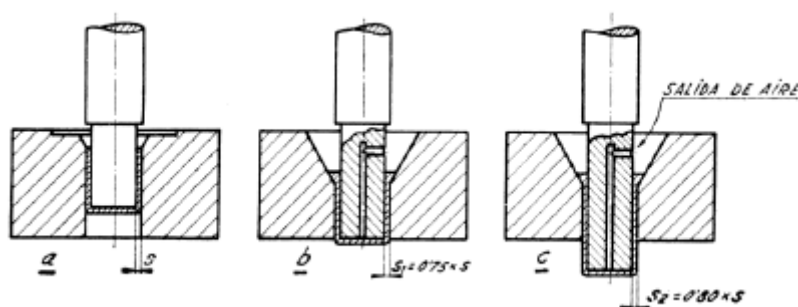
$$h \leq 0.3 \sqrt[3]{d^2} \sqrt{s}$$

Donde:

h = Altura de la pared lateral en mm, d = Diámetro del émbolo en mm y s = Espesor de la chapa en mm

- EMBUTICIÓN POR ESTIRADO

La operación de embutido por estirado consiste en disminuir el espesor de la pared cilíndrica de un recipiente previamente embutido mediante sucesivas operaciones a fin de conseguir las dimensiones deseadas. En esta operación que se realiza en frío, se obliga al material a pasar a través de una corona circular para salir deformado permanentemente después de haber adquirido una sección circular más pequeña y una longitud mayor.

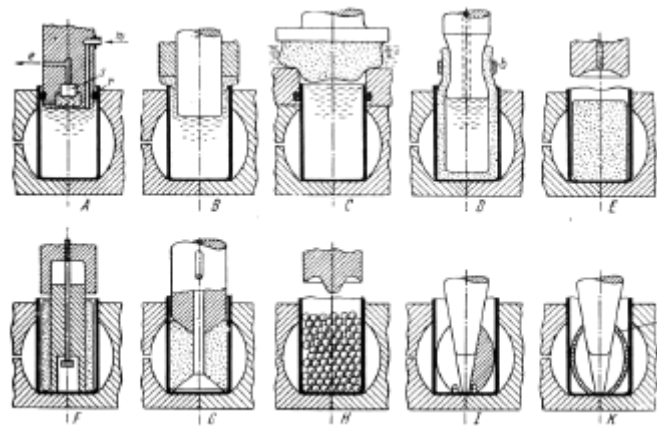


El porcentaje de reducción del espesor depende de la calidad del material y de su ductilidad; para las mejores calidades de acero se pueden conseguir reducciones máximas de espesor de un 35%, pero si los recipientes deben someterse a grandes fuerzas se aconseja reducir lentamente el espesor.

- PROCEDIMIENTOS DE ENSANCHADO O ABOMBADO

Todas las piezas embutidas presentan la tendencia a abombarse debido a los esfuerzos de tracción que se superponen en la parte inferior de la pared lateral. Esta tendencia a la convexidad no puede medirse en las piezas embutidas por el procedimiento de embutición por estirado y en las embuticiones de cuerpos cilíndricos realizadas con un estrecho juego de embutición.

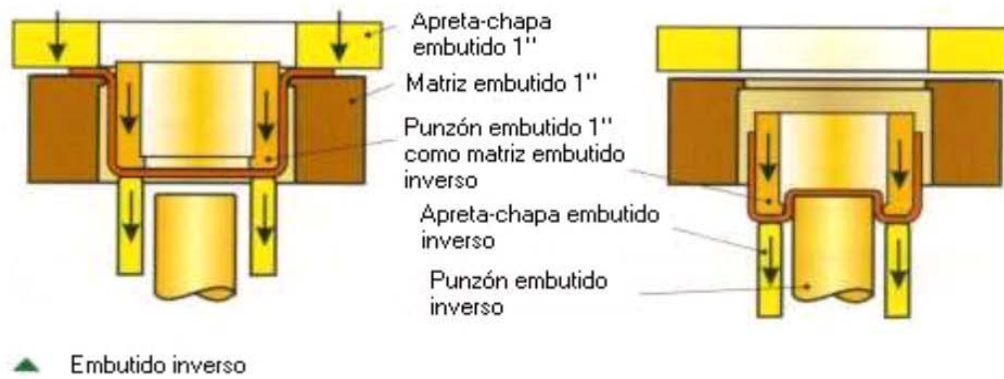
En la siguiente figura se presentan diez procedimientos distintos para abombar piezas de chapa embutidas, siendo los cuatro primeros del tipo denominado húmedo.



- EMBUTIDO INVERSO

La embutición invertida ofrece la posibilidad de ahorrar una o dos etapas de embutición y también una mayor altura, contando con los materiales convenientemente dispuestos y acondicionados para tal fin. Con éste tipo de embutición la pieza previamente embutida se dispone con la abertura hacia abajo sobre una matriz negativa de embutir. El punzón de embutir que desciende sobre la pieza la vuelve de modo que lo que era hasta ahora superficie interior se convierte en superficie exterior de la misma. De ésta modo se obtiene profundidades mayores que con la embutición corriente. Por lo general no se necesita ningún dispositivo pisador.

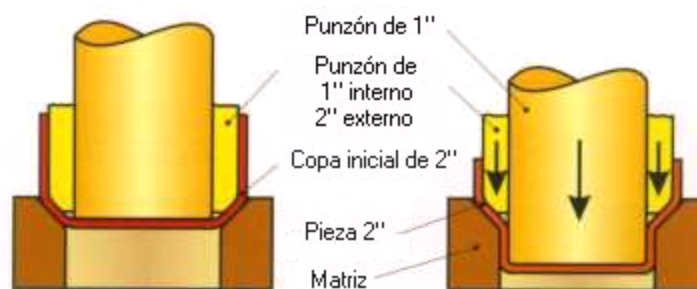
La embutición negativa se emplea casi exclusivamente para piezas cilíndricas o piezas redondeadas no cilíndricas, por ejemplo carcasas de faro o proyectores. Para piezas irregulares resultaría muy dificultosa la ejecución de las aberturas en la matriz invertida.



- EMBUTIDO CON PUNZÓN TELESCÓPICO

Técnica usada en piezas previamente embutidas, con la finalidad de conseguir una mayor altura y por consiguiente una pieza de menor diámetro, para ello hay que contar con un juego de punzón y matriz adecuado. Con el embutido previo, el material deformado ha conseguido una acritud, debe ser tratado térmicamente para recobrar su elasticidad; esto se debe aplicar en cada fase del proceso.

El objetivo se consigue forzando el material a deslizarse adecuadamente entre dos punzones adaptados convenientemente a la nueva configuración de la matriz.



B.2 Deformación plástica de los materiales

B2.1 Deformación plástica

Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada. Esto sucede porque, en la deformación plástica, el material experimenta cambios termodinámicos irreversibles al adquirir mayor energía potencial elástica. La deformación plástica es lo contrario a la deformación reversible.

B2.1.1 Cambios de forma y concepto de deformación

Un material se deforma (cambia de forma) de acuerdo con el estado de esfuerzos que estén actuando sobre él. Un esfuerzo de tracción induce al material a alargarse en dirección paralela a esta fuerza, y a contraerse lateralmente a lo largo de una dirección perpendicular a la misma. Las cantidades normalizadas se conocen como deformaciones. A la deformación paralela a la fuerza se denomina deformación longitudinal o por tracción, en tanto que, a la deformación perpendicular recibe el nombre de deformación lateral. Por tanto:

$$\epsilon_L = \frac{\Delta L}{L} \quad \epsilon_w = \frac{\Delta w}{w}$$

Donde:

ϵ_L = Deformación por tracción

ϵ_w = Deformación lateral

L= Dimensión original paralela a la fuerza de tracción

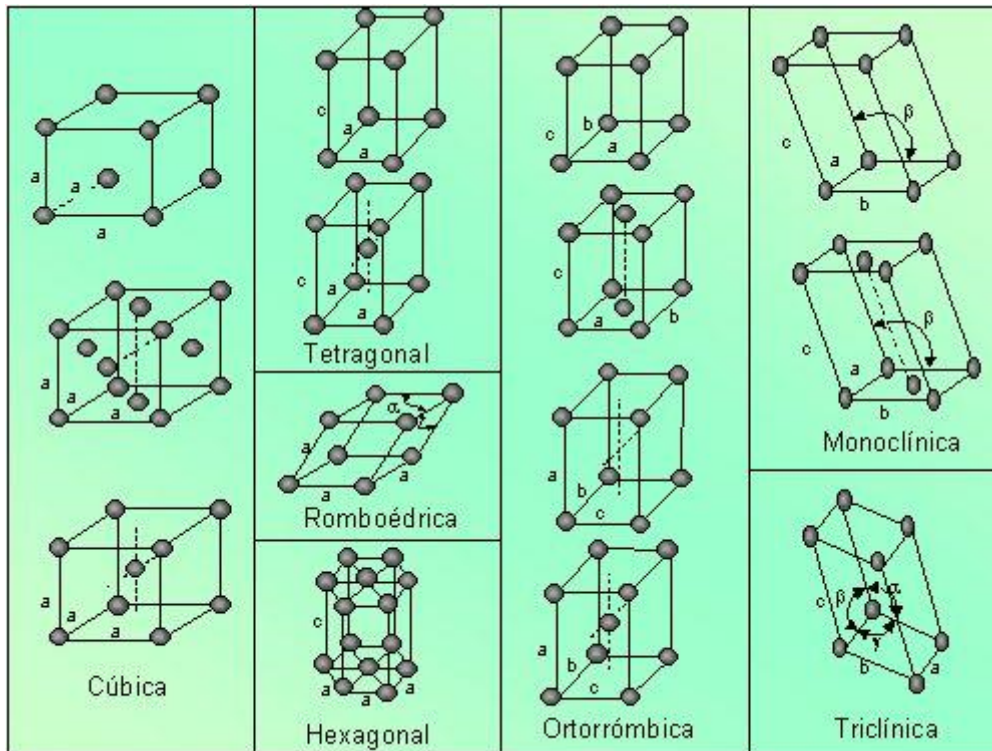
w= Dimensión original perpendicular a la fuerza de tracción

La razón entre la deformación lateral y la deformación longitudinal se define como la razón de Poisson

$$\nu \equiv -\frac{\epsilon_w}{\epsilon_L}$$

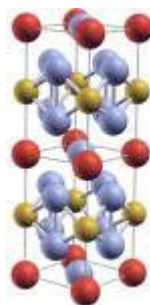
B2.1.2 Sistema de deslizamiento en los metales y deformabilidad

La deformación de los materiales se produce por deslizamiento sobre planos preferentes a lo largo de ciertas direcciones preferentes. A estos se les llama planos de deslizamiento y direcciones de deslizamiento respectivamente una combinación de un plano de deslizamiento con una dirección de deslizamiento se denomina sistema de deslizamiento.



Dentro de una estructura cristalina existen diferentes imperfecciones o defectos en la disposición de los átomos, estos defectos pueden ser del tipo puntual, linear y planar.

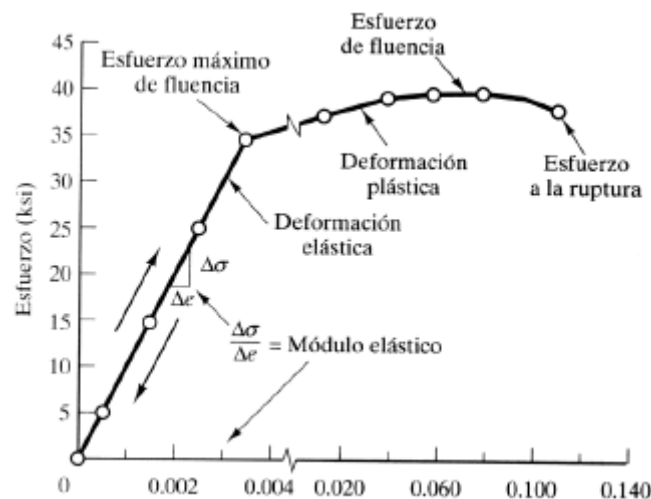
Los defectos lineales en una estructura cristalina se denominan dislocaciones, estas mediante su desplazamiento en un sistema de deslizamiento, permiten al material deformarse plásticamente y a la vez le otorgan ductilidad.



B2.1.3 Curva de esfuerzo-deformación ingenieril

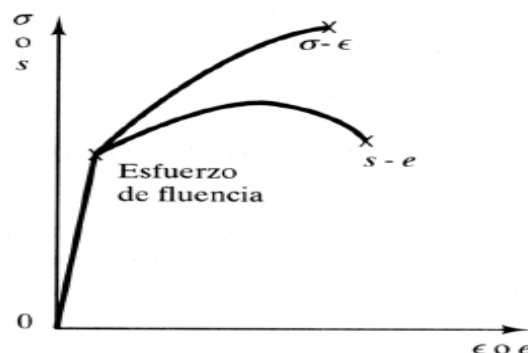
La curva de esfuerzo - deformación ingenieril es un diagrama convencional que explica el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a un determinado esfuerzo. Esta curva (curva s-e) muestra tres partes características:

1. Una porción lineal inicial que se conoce como la región elástica
2. Una porción cuya pendiente disminuye continuamente a medida que el esfuerzo aumenta hasta que la pendiente se hace cero (conocida como la región de endurecimiento por deformación)
3. Una porción donde el esfuerzo se reduce y donde la probeta se adelgaza y exhibe deformación no uniforme hasta que se rompe



B2.1.4 Curva de esfuerzo verdadero – deformación verdadera

La curva de esfuerzo – deformación no representa una indicación precisa de los esfuerzos verdaderos y deformaciones verdaderas del material, debido a que se basa en las dimensiones originales de la probeta. Estas dimensiones cambian continuamente en el curso del ensayo y el esfuerzo real o verdadero en un momento dado es mucho mayor que el representado por la curva s – e.



Si bien la curva $s - e$ es suficiente para el diseño debido a que subestima la capacidad real del material, la curva de esfuerzo - deformación verdadera ($\sigma - \epsilon$) es la propiedad más importante en las operaciones de formado o manufactura porque describe la necesidad de carga real del material para la posterior deformación o flujo de los elementos sólidos. Por esta razón a la curva $\sigma - \epsilon$ se le suele llamar curva de esfuerzo de fluencia.

B2.2 Criterios de fluencia

En numerosos problemas técnico, el estado de esfuerzo y deformación en puntos críticos puede ser muy complejo. Se dispone de procedimientos matemáticos idealizados para determinar esos estados. Sin embargo, la respuesta precisa de los materiales reales a tales esfuerzos y deformaciones se resiste a formulaciones exactas.

Sólo la idealización clásica de los criterios de fluencia de los materiales ayuda a resolver estos problemas. El criterio de fluencia más ampliamente aceptado para la aparición del comportamiento inelástico (fluencia) en materiales dúctiles bajo esfuerzos combinados es el de la Energía Máxima de Distorsión

B2.2.1 Criterio de energía máxima de distorsión

El criterio de von Mises, también llamado criterio de la máxima energía de distorsión, es un criterio de resistencia estática, aplicado a materiales dúctiles, según el cual, el material no fluirá en el punto analizado siempre que la energía de distorsión por unidad de volumen en el punto no supere la energía de distorsión por unidad de volumen que se da en el momento de la fluencia en el ensayo de tracción. El criterio de resistencia se escribe matemáticamente como:

$$\sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)} < S_y$$

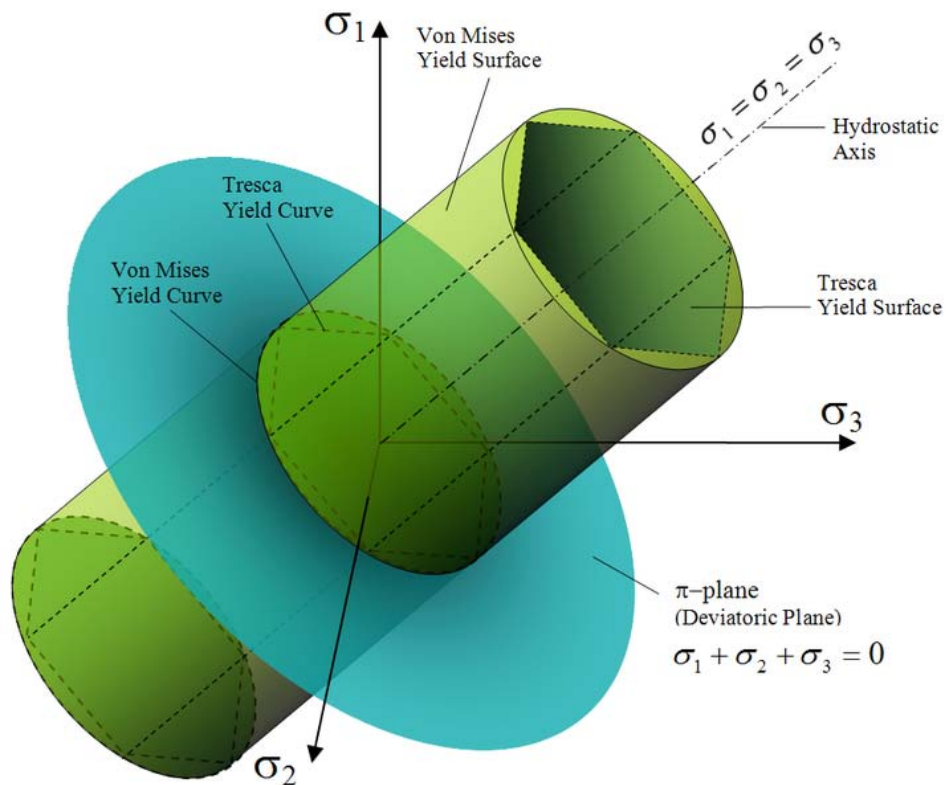
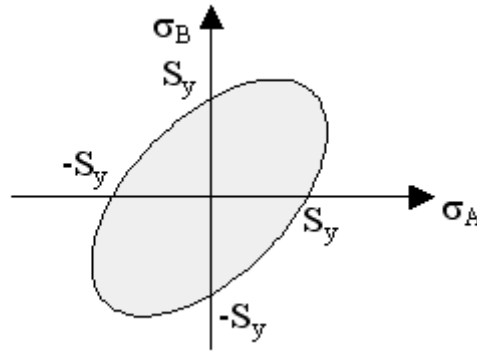
Donde $S_y > 0$ es el límite de fluencia a tracción y $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$

El coeficiente de seguridad en el punto analizado, de acuerdo con el criterio de von Mises se obtiene de:

$$n_s = \frac{S_y}{\sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)}}$$

Expresión que es válida para cualquier signo de las tensiones principales.

En el caso del estado tensional biaxial el criterio de von Mises puede representarse gráficamente en un diagrama σ_A - σ_B donde éstas representan las dos tensiones principales no nulas, como se indica en la figura. La zona sombreada representa la zona segura, para la cual el material no fluye de acuerdo con dicho criterio.



B2.3 Límites de deformación

Para que una operación de estampado tenga éxito, se deben controlar las siguientes variables: las características del material, la geometría de las herramientas y la lubricación; de estas variables dependerá el éxito de cualquier proceso de conformado.

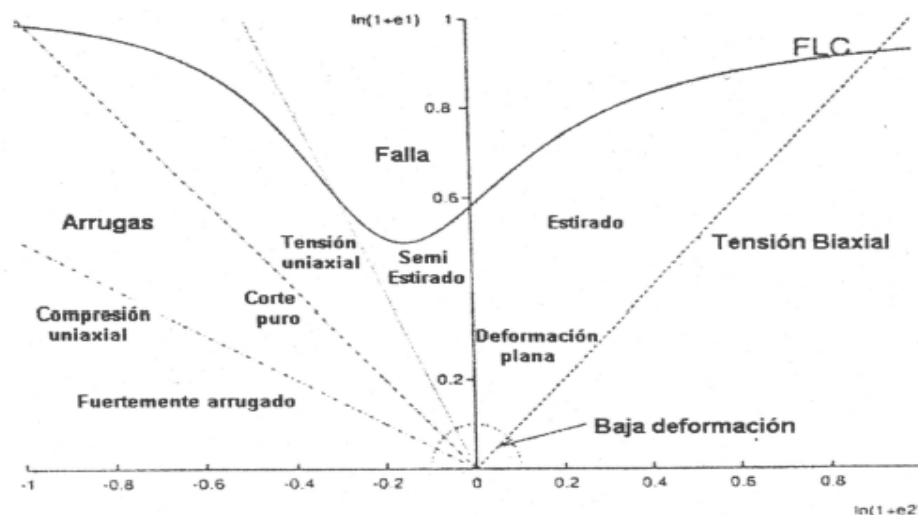
En los procesos de conformado de materiales la deformación ocurre de la diversas maneras y en distintas zonas del material, un método práctico y el más utilizado en los procesos de embutición es el de generar la curva límite de deformación del material a utilizar.

B2.3.1 Curva Límite Deformación FLC

Esta curva representa el límite de deformación máxima admisible para un material. Si los valores de deformación sobrepasan esta curva, el material falla y si están bajo la curva el material se encuentra en una zona segura. Esta técnica se basa en la determinación de las deformaciones máximas (ϵ_1, ϵ_2) admitidas por el material en los diversos estados de esfuerzos.

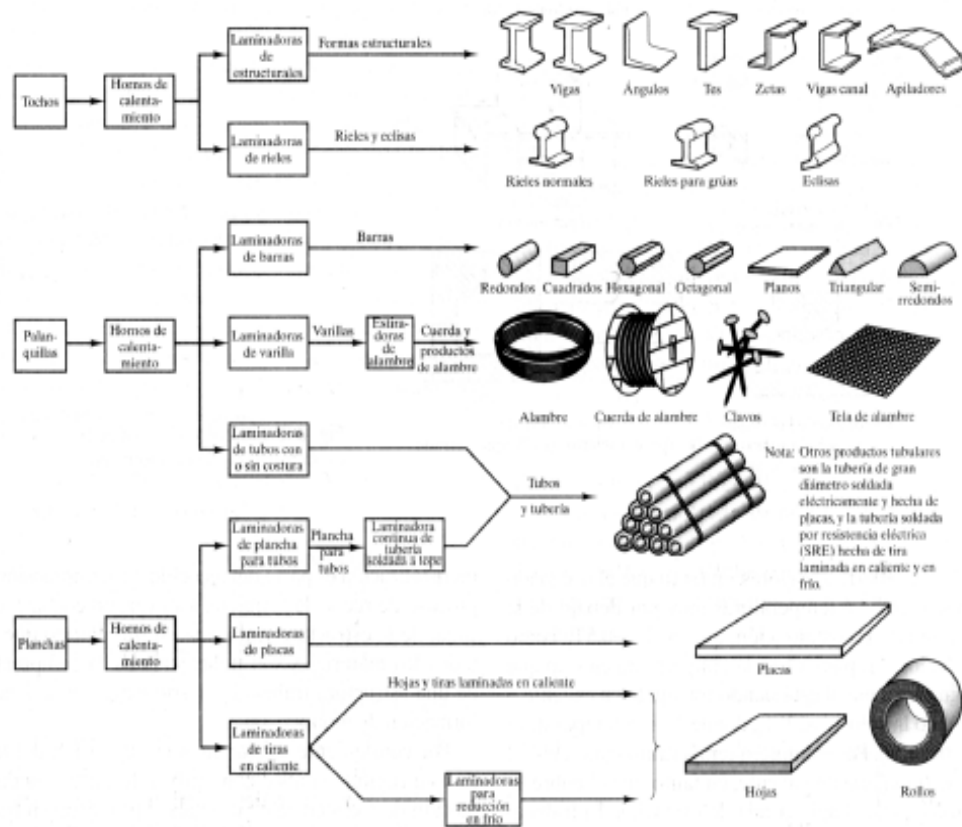
B2.3.2 Diagrama Límite de Deformación FLD

Este diagrama representa el estado mecánico de conformado de un material indicando las deformaciones que están presentes y su nivel de seguridad. Un conjunto de puntos es representado en este diagrama, cada uno de los cuales corresponde a un nodo de la malla en la chapa. Generalmente se dibuja en conjunto con la curva FLC (Forming Limit Curve), y dependiendo de la ubicación de la nube de puntos con respecto a esta curva, se obtiene la información del estado de deformaciones de la chapa. En la siguiente figura se observan las diferentes zonas de deformación en un diagrama FLD



B2.4 Procesos de deformación

Los procesos de deformación se clasifican en términos generales en dos categorías. Procesos primarios que se llevan a cabo en las instalaciones de los productores y proveedores de metal, y, en general comprenden las operaciones de trabajo en caliente, como la división de los lingotes en planchas, palanquillas o tochos y la posterior conformación en caliente para obtener diversas formas estructurales, barras y productos planos como se puede apreciar en la siguiente figura



Algunos productos de los procesos primarios se utilizan en los procedimientos secundarios o procesos de fabricación como: estirado, forjado, estampado, soldado, maquinado, punzonado y corte.

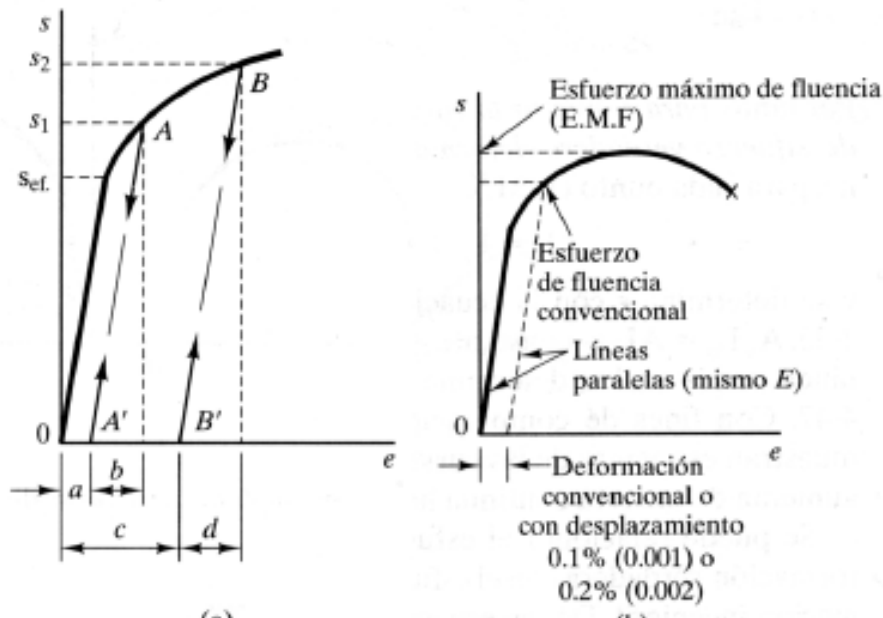
B2.4.1 Trabajo en frío

En la serie de operaciones de manufactura, ésta es habitualmente la última operación y se conoce como el acabado en frío de las piezas y productos. Originalmente, las operaciones de acabado en frío se empleaban solamente para obtener

tolerancia dimensional y buen acabado superficial, a medida que se produjeron más productos trabajados en frío fue difícil no advertir el considerable reforzamiento producido en el material por el acabado en frío.

B2.4.2 Reforzamiento para el trabajo en frío

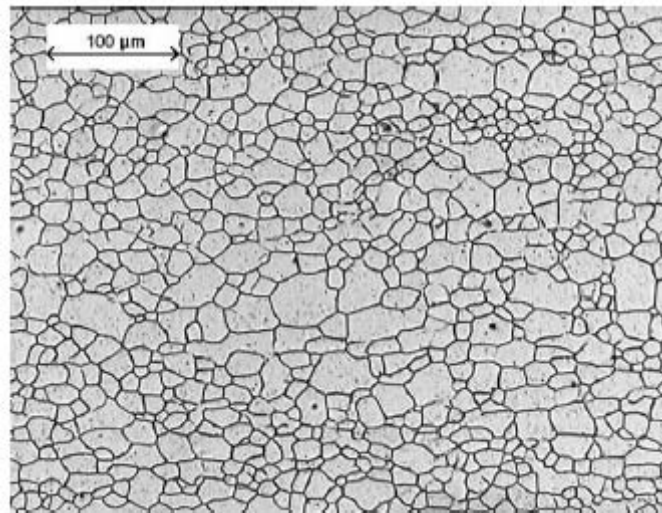
El trabajo en frío o endurecimiento por deformación nos indica que el esfuerzo de fluencia de los materiales aumenta si la deformación inicial sobrepasa la resistencia al esfuerzo de fluencia del material. Sin embargo este aumento de resistencia se da acompañado de una pérdida de ductilidad.



En términos de los procesos de deformación secundarios, el fenómeno de trabajado en frío en la curva de esfuerzo – deformación significa que existe un límite para el trabajo en frío, después del cual el material se fractura por pérdida de ductilidad. También significa que un material endurecido por deformación requiere de mayores esfuerzos para formar las piezas y mayor capacidad de la maquinaria.

B2.5 Acero tipo DC03

Los aceros DC03 están constituidos por una matriz ferrítica con colonias de perlita. En la figura de abajo se muestra un corte transversal donde se puede observar los granos de ferrita de color blanco con colonias de perlita de color oscuro. El bajo porcentaje de carbono proporciona la alta conformabilidad. Esta gama de chapas de acero dulce no aleado está destinada a la conformación mediante estampación profunda y extra profunda. Estos productos se utilizan masivamente en la industria del automóvil, tanto para piezas de aspecto como para piezas de estructura.



Designación		Límite elástico [Mpa]	Resistencia Máxima [Mpa]	A ₈₀ [% mín]	R ₉₀ [mín]	n ₉₀ [mín]	Composición química % máx. en colada				
s/EN 10027-1 y CR 10260	s/EN 10027-2						C	P	S	Mn	Ti
DC01	1.0330	140-280	270-410	28			0,12	0,045	0,045	0,06	
DC03	1.0347	140-240	270-370	34	1,3		0,10	0,035	0,035	0,15	
DC04	1.0338	140-210	270-350	38	1,6	0,18	0,08	0,030	0,030	0,40	
DC03	1.0312	140-180	270-330	40	1,9	0,20	0,06	0,025	0,025	0,35	
DC06	1.0873	120-180	270-350	38	1,8	0,22	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3

Anexo C. Diseño experimental

C.1 Simulación en Autoform

El software de AutoForm ofrece soluciones para las industrias matriceras y de conformado de chapa metálica. El uso del software de AutoForm mejora la fiabilidad en la planificación, reduce el número de ensayos de matrices y el tiempo de puesta a punto, como resultado se obtienen piezas con mayor calidad y diseños de matrices que se pueden producir con máxima confianza. Además, el tiempo de prensa y los ratios de pieza defectuosa se reducen sustancialmente.

Las soluciones de AutoForm se basan en la práctica, en el know-how industrial y en la experiencia en el conformado de chapa metálica, formando un sistema completo e integrado con funciones altamente especializadas para analizar, revisar y optimizar cada fase del desarrollo del proceso.

AutoForm proporciona soluciones a lo largo de todo el desarrollo del proceso de conformado de chapa metálica. Estas soluciones se extienden desde módulos independientes para pequeñas y medianas empresas hasta sistemas multimódulo integrados para grandes empresas.



C1.1 Módulos de Autoform

a) Módulos de diseño

- AutoFom Part-Designer. Para modificaciones de pieza, rápidas y fáciles. La ingeniería de conformado requiere continuos re-diseños de la pieza, y re-evaluaciones de los re-diseños hasta que la pieza sea conformable de una forma robusta. Para conseguir un diseño de pieza conformable de una forma rápida y fiable, las modificaciones de la pieza deben ser rápidas y fáciles de implementar, y las valoraciones de conformabilidad rápidas de obtener. Sólo entonces se asegura el diseñador que la geometría óptima del producto se ha establecido y validado. Sin embargo depender de un sistema

CAD no es una forma eficiente de conseguirlo.

AutoForm-PartDesigner es una herramienta versátil, de fácil manejo, que ha sido añadida a AutoForm-OneStep para implementar las modificaciones de la pieza rápidamente permitiendo llevar a cabo en tiempo real sofisticados estudios de diseño.



Cortesía de Schweikert

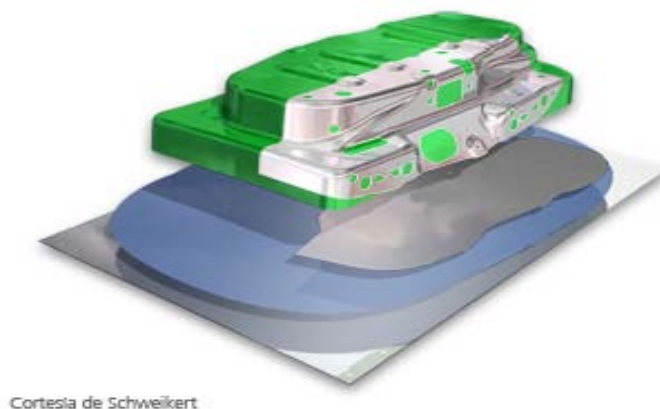
- AutoForm Die Designer. Las potentes funcionalidades de AutoForm-DieDesigner, su facilidad de uso y su productividad hacen del software la elección de matriceros y departamentos de ingeniería de todo el mundo:



- Determinación de las herramientas óptimas 3D del método y el concepto de herramientas resultantes. Las funcionalidades avanzadas generan las soluciones optimizadas del proceso en el menor tiempo posible.
- Soporte óptimo de ingeniería simultánea. AutoForm-DieDesigner crea soluciones simultáneas para el desarrollo del producto, construcción de herramientas, y producción en serie.
- Reducción considerable del tiempo de desarrollo del proceso durante el desarrollo

del producto, construcción de herramientas, y producción en serie.

- Mejora notable de la calidad de los datos CAD de la pieza, layout del proceso, concepto de la herramienta así como producción en serie de la pieza
 - Aumento de la robustez del proceso de estampado
-
- AutoForm Blank-Designer. El módulo de software AutoForm-BlankDesigner ayuda a reducir los costes de material en las etapas iniciales del ciclo de desarrollo, desde el concepto del producto hasta la producción de las herramientas, proporcionando los siguientes beneficios:
 - Análisis de coste iniciales durante el desarrollo del producto
AutoForm-BlankDesigner determina el contorno de chapa en segundos, necesitando como datos iniciales sólo la superficie en CAD de la pieza.
 - Reducción del uso de material durante el diseño de la matriz
Los diseñadores de herramientas y matrices también pueden beneficiarse de AutoForm-BlankDesigner. Podrán calcular rápidamente el desarrollo de chapa requerido según los diferentes conceptos generados con AutoForm-DieDesigner.
 - Determinación de chapas trapezoidales optimizando el coste
AutoForm-BlankDesigner orienta y dispone la geometría desarrollada en un contorno rectangular o trapezoidal de chapa, y con ello los costes de la bobina se minimizan.
 - Minimización del coste de la bobina durante el proceso de diseño
Las formas estándares para los desarrollos de chapa obtenidos con AutoForm-BlankDesigner se pueden usar directamente en AutoForm-Nest para calcular el mejor layout.



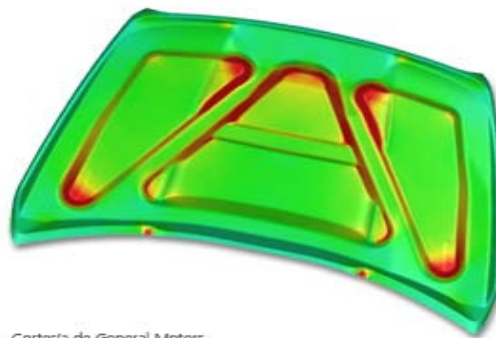
Cortesía de Schweikert

- AutoForm Nest. Minimizar el uso del material es uno de los factores más importantes para reducir el coste de una pieza metálica, debido a que los costes del material representan el 80% del coste total de la pieza. Éste es un módulo especializado para determinar el layout óptimo de la bobina, y es ideal para trabajos de evaluación y estimación de costes, así como de planificación.

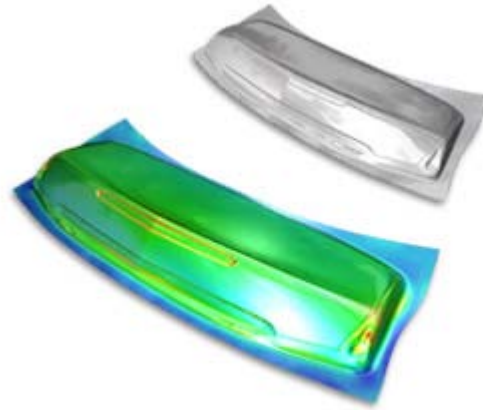


b) Módulos de simulación

- AutoForm One-Step. Ofrece una evaluación de la embutibilidad de piezas metálicas, que permite una verificación rápida del diseño. Este módulo tiene numerosas posibilidades de aplicación en el ciclo de desarrollo del producto, desde la conformabilidad del producto, optimizando el coste del material, hasta la ayuda en etapas iniciales del diseño de la matriz y del layout del proceso. Es utilizado en aquellas geometrías de piezas que pueden ser conformadas en un solo paso. La formación inversa y en un solo paso de AutoForm *One-Step* permite la simple y precisa determinación de la preforma y el mínimo requerimiento de material de forma rápida, así como simular y modificar los diferentes diseños planteables reduciendo los ciclos de desarrollo del producto.



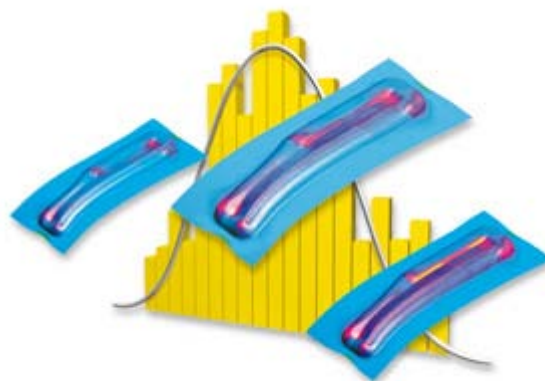
- AutoForm Incremental. Rápida y precisa simulación y validación del proceso completo de estampación. AutoForm-Incremental incorpora una muy avanzada tecnología que permite afrontar los actuales retos diarios en constante evolución y en el cada vez más competitivo mercado. Esto exige una gran variedad de productos, innovadores y de alta calidad, al mismo tiempo que una reducción de costes y de los cada vez más cortos plazos de entrega.



Cortesía de Daimler AG

c) Módulo de diseño y análisis robusto de experimentos

- AutoForm Sigma. Permite a los diseñadores y a los ingenieros mejorar la robustez de los procesos de conformado gracias a la combinación de técnicas de control estadístico de proceso, y simulación de conformado de chapa. Este programa tiene en cuenta la variabilidad inherente en los procesos de conformado (variabilidad en las características, del material), de modo que las piezas y herramientas resultantes se consiguen en un proceso de producción más eficiente y estable. El módulo del software AutoForm-Sigma está especializado en analizar y mejorar la robustez de piezas de chapa metálica y sus procesos. Sirve para mejorar y validar los procesos de conformado, y para reducir o eliminar los defectos de las piezas. En este módulo se apoya este proyecto a la hora de aplicarlo en nuestra copa cilíndrica, como se ve en el siguiente punto.

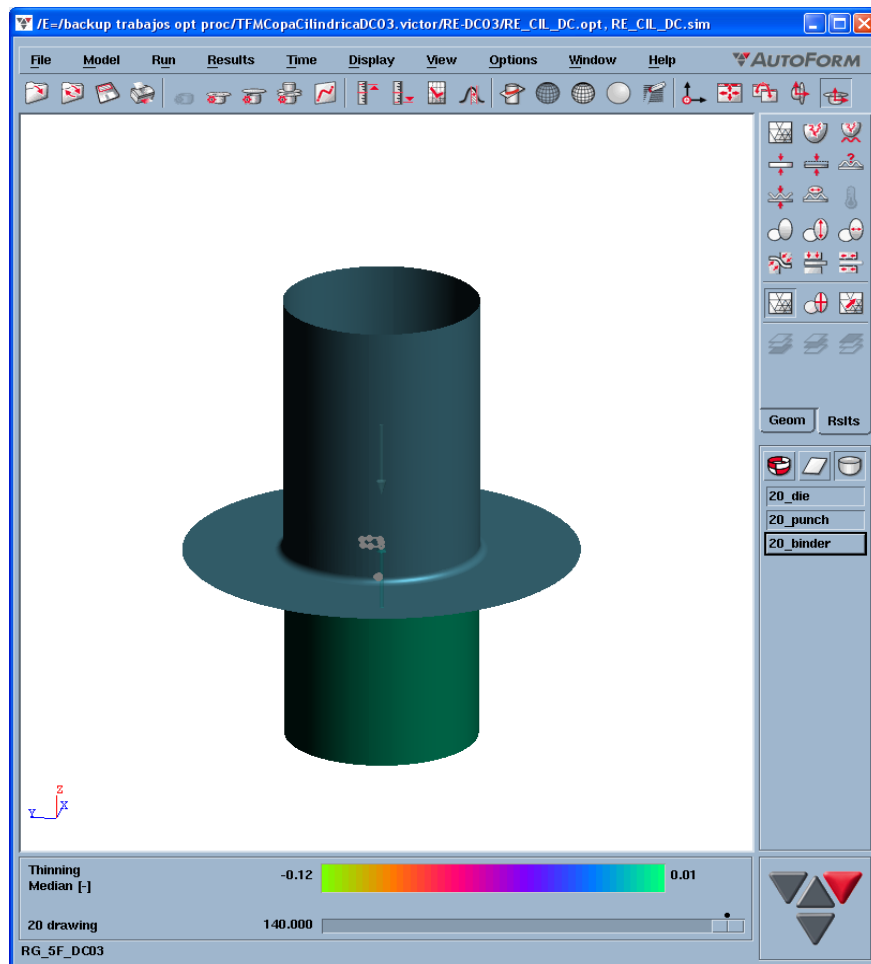


C1.2 Aplicación en copa cilíndrica

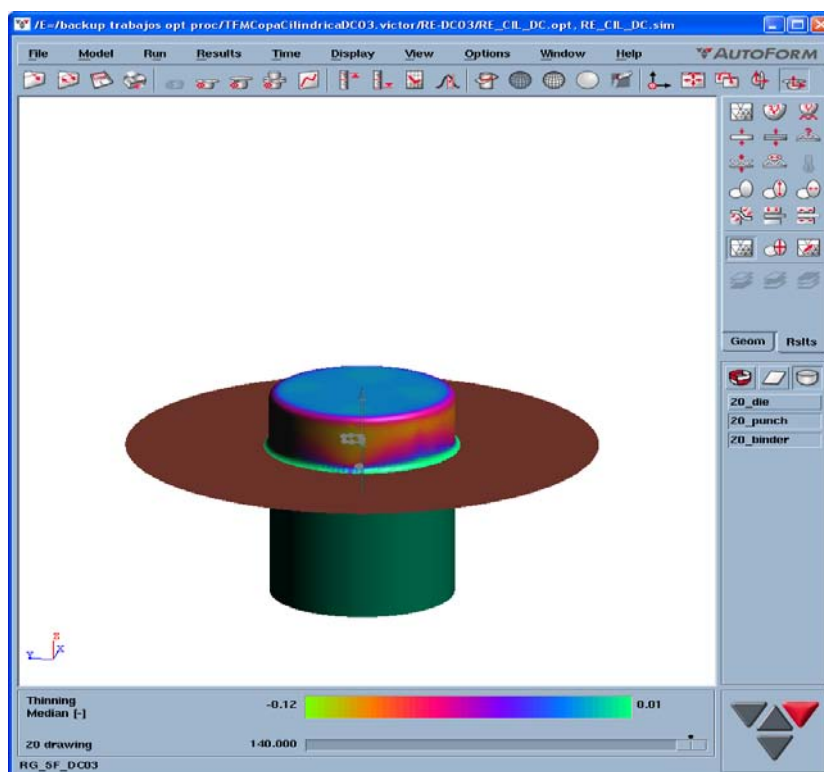
A continuación se muestra el diseño aplicado a nuestra copa cilíndrica. El análisis de los resultados se puede observar en el anexo E.

Primero se utilizó un programa de dibujo (SolidEdge) para dibujar los elementos necesarios. En este caso se tratan de la matriz, el punzón, el pisador y la preforma. Una vez se finalizaron estos, se importaron a Autoform. Aquí se fueron completando todos los campos para comenzar la simulación. Algunos de ellos con el tipo de simulación a ejecutar, características del material, rango de los parámetros de estudio etc.

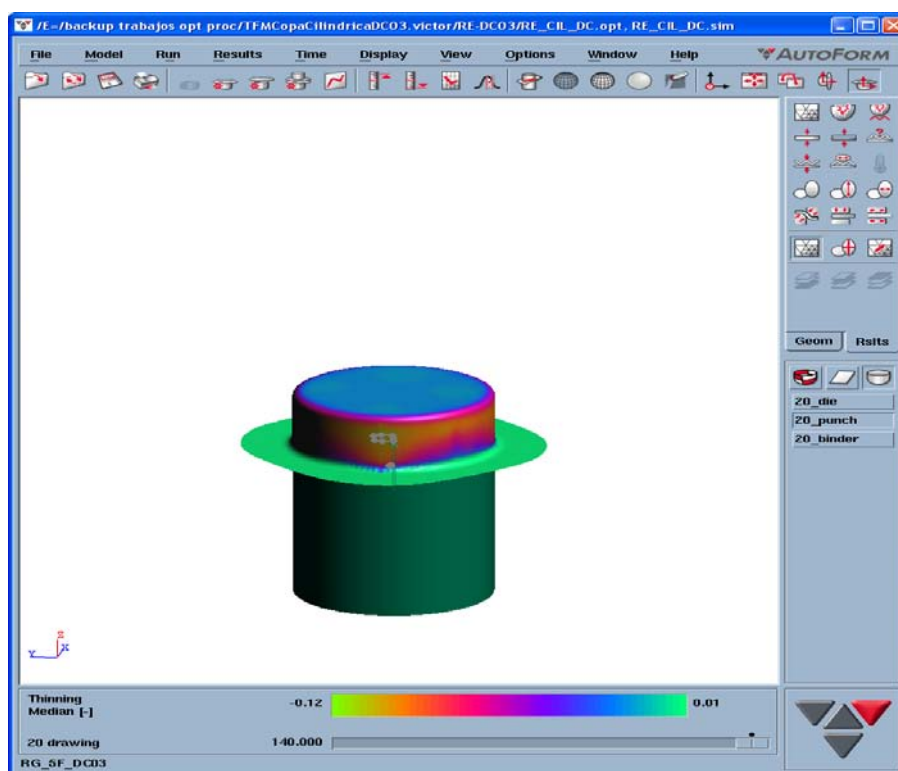
El resultado del diseño se puede observar en las siguientes imágenes:



Representación de matriz y punzón



Representación de punzón, pisador y preforma embutida

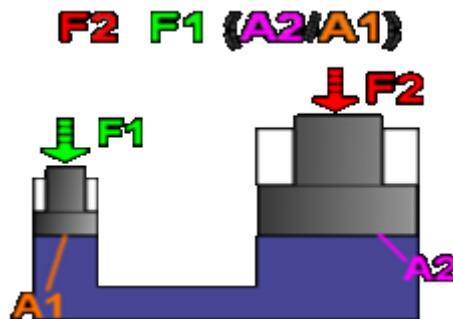


Representación de punzón y preforma embutida

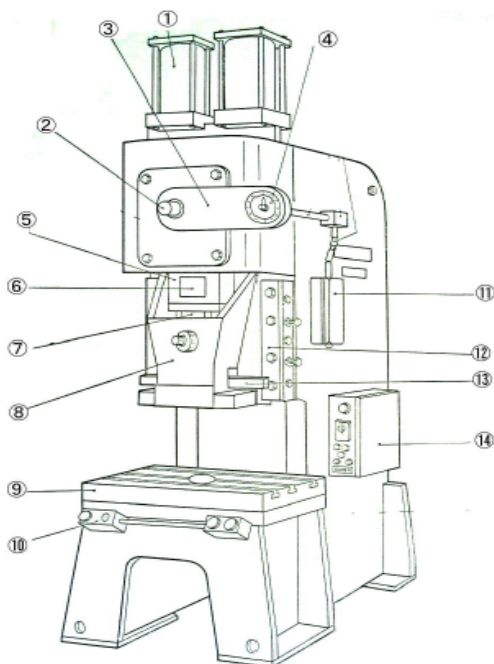
C.2 Prensa

De manera genérica, podemos decir que la prensa es una máquina herramienta que tiene como finalidad lograr la deformación permanente, o cortar un determinado material mediante la aplicación de una carga.

El principio de funcionamiento de la prensa se basa en la teoría de Pascal, “toda presión aplicada a un fluido confinado se transmite sin reducción a todos los puntos del fluido y a las paredes que lo contienen” Un depósito con dos émbolos de distinta sección conectados a él permite amplificar la fuerza aplicada en el émbolo pequeño y además cambia la dirección de la fuerza aplicada. El punto de aplicación de las fuerzas debe estar situado sobre la sección de los émbolos.



Consiste de un bastidor que sostiene una bancada y un ariete, una fuente de potencia, y un mecanismo para mover el ariete linealmente y en ángulos rectos con relación a la bancada. Una prensa debe estar equipada con matrices y punzones diseñados para ciertas operaciones específicas.



1. Cilindro de contrabalance.
2. Eje cigüeñal.
3. Cubierta de cadena
4. Monitor de ángulo de paro
5. Varilla de conexión
6. Mecanismo fijación del ajuste
7. Tornillo de ajuste
8. Corredera
9. Sufridera
10. Boton de arranque, controles bimanuales, paro de emergencia...
11. Interrupción de límite de rotación
12. Ranura de la corredera
13. Barra expulsora
14. Cuadro de control

En concreto, centrándonos en la prensa que aquí se emplea para los ensayos de embutición, podemos decir que se usa la máquina marca TJF/Garnet modelo RV-100E ubicada en la nave 4 de la E.U.T.I.Z. Las características esenciales de la máquina están normalizadas. Se trata de una prensa hidráulica de 100Tn.



Esta prensa hidráulica está fabricada para el conformado de chapa y similares mediante el acoplamiento de un útil adecuado a la labor a realizar.

La prensa es accionada mediante un grupo hidráulico independiente, unido a la prensa por latiguillos flexibles y las conexiones eléctricas correspondientes.

Es pues una prensa hidráulica de estructura rígida, con mesa inferior y superior ranurada y laterales cerrados.

Dispone de un cilindro principal de doble efecto para el prensado.

La mesa superior dispone de dos guías laterales.

Cilindro inferior para la expulsión de la pieza o como cojín para el conformado.

Grupo hidráulico con bomba doble y electroválvulas para la maniobra, así como todos los elementos necesarios para el correcto funcionamiento de la prensa.

Regulador de presión frontal y manómetro para regular la presión del cojín.

Victor Cásedas Tejada - MSM

Maniobra por baja tensión a 24v, accionamiento por pedales de maniobra, con paro de emergencia.

Dispone de fotocélulas de seguridad en el frontal de la prensa.

PRENSA HIDRÁULICA Mod. RV100E	
POTENCIA	100T
SUPERFICIE ÚTIL MESA INFERIOR	500X400 mm
SUPERFICIE ÚTIL MESA SUPERIOR	460X240 mm
DISTANCIA MÁXIMA ENTRE MESAS	420 mm
DISTANCIA MÍNIMA ENTRE MESAS	170 mm
CARRERA	250 mm
RANURAS T DE LAS MESAS	DIN 650 M14X16 mm
ALTURA DE TRABAJO	900 mm
LUZ FRONTAL	550 mm
DIÁMETRO GUÍAS SUPERIORES	40 mm
GRUPO HIDRÁULICO	
POTENCIA MOTOR	10 CV
BOMBA DOBLE	49 + 12L/min
PRESIÓN BAJA	80 bar
PRESIÓN MÁXIMA	320 bar
CAPACIDAD ACEITE	250 L

CILINDRO PRINCIPAL	
DIÁMETRO NOMINAL	200 mm
DIÁMETRO VÁSTAGO	150 mm
CARRERA	250 mm
PRESIÓN MÁXIMA	400 bar
CILINDRO COJIN	
DIÁMETRO NOMINAL	80 mm
CARRERA	100 mm
POTENCIA	10 tn
VELOCIDADES DE DESPLAZAMIENTO	
VELOCIDAD DE APROXIMACIÓN	30 mm/s
VELOCIDAD DE PRENSADO	6'2 mm/s
VELOCIDAD DE RETORNO	48 mm/s
DIMENSIONES	
ANCHO	1190 mm
LARGO	650 mm
ALTO	2135 mm
PESO	2250 Kg
CONEXIÓN RED	
TENSIÓN	380V. + neutro
POTENCIA INSTALADA	7'5 kW

C.3 Minitab. Software de tratamiento estadístico de datos

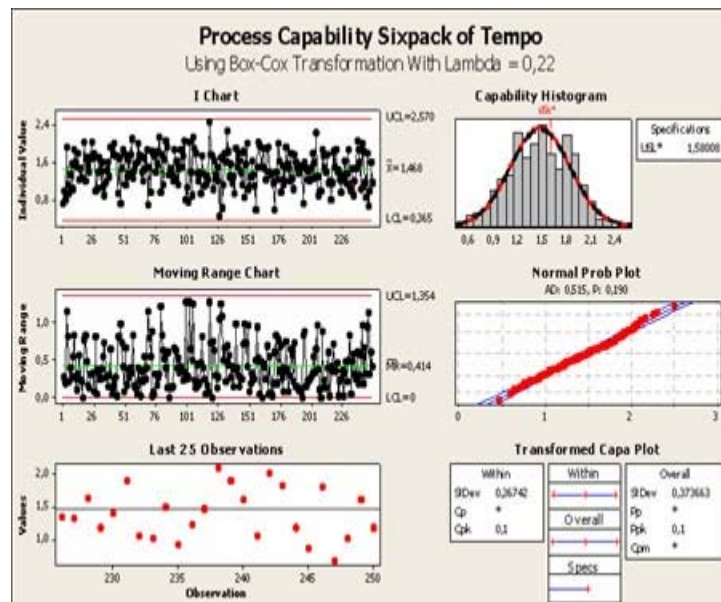
Minitab Inc. es una compañía privada cuya sede principal se encuentra en State College, Pensilvania, y tiene subsidiarias en el Reino Unido, Francia y Australia. Además, Minitab tiene representantes y distribuidores en muchos países alrededor del mundo.

El programa Minitab® Statistical Software fue desarrollado en 1972 por tres profesores de Estadística de Penn State University. Uno de los desarrolladores originales, Barbara Ryan, es la presidenta y directora ejecutiva de Minitab.

En poco tiempo, Minitab llegó a ser, y continúa siendo, el principal software del mundo para la enseñanza de estadística. En todo el mundo, Minitab ha sido el software con el que más estudiantes han aprendido estadística.

Asimismo, Minitab es el software utilizado con mayor frecuencia en Six Sigma, la principal metodología del mundo para el mejoramiento de la calidad.

Más de 450 empresas de la clasificación Fortune 500 utilizan Minitab, y prácticamente todas las organizaciones importantes de consultoría y capacitación para el mejoramiento de la calidad usan y recomiendan el software de la compañía.



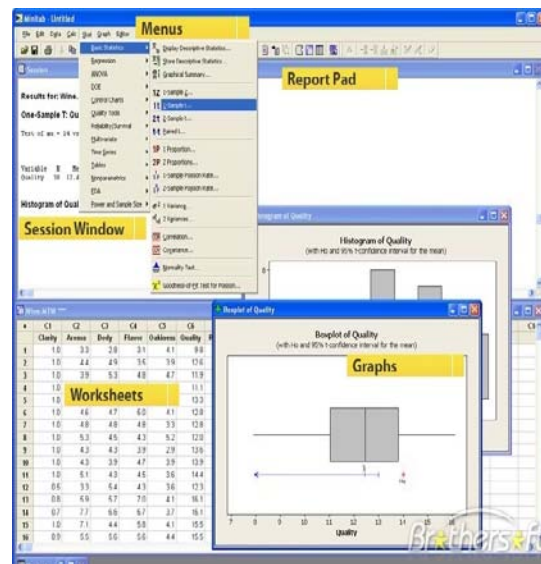
Así pues, Minitab ofrece herramientas precisas y fáciles de usar para aplicaciones estadísticas generales y muy especialmente para control de calidad. Líder tradicional en la docencia de la estadística está hoy presente en las más prestigiosas empresas.

En un entorno cambiante, en permanente evolución, las organizaciones necesitan evaluar todos los aspectos implicados en sus procesos. A este efecto, las herramientas estadísticas nos permiten acceder a un mejor conocimiento de la información contenida en los datos mediante metodologías y procesos de recogida, análisis e interpretación. En los últimos años, la evolución del software estadístico ha significado un importante ahorro en tiempo, en precisión y en calidad de representación gráfica. Con 25 años de andadura internacional, el software estadístico Minitab es una herramienta compacta, versátil y de fácil manejo.

Usado en más de 2.000 instituciones universitarias y mencionado en más de 300 publicaciones de estadística, Minitab es la herramienta predilecta en las industrias de más de 60 países. La confiabilidad de sus algoritmos estadísticos y la sólida base de la combinación de potencia y simplicidad de manejo le han hecho merecer la confianza de los usuarios.

- Sus principales características serían las siguientes:

- Estadística básica y avanzada
- Regresión y ANOVA
- SPC
- DOE - Diseño de experimentos
- Gage R&R
- Minitab Análisis de fiabilidad
- Tamaño de muestra y capacidad
- Series temporales y predicción
- Potente importación, exportación y manipulación de datos
- Lenguaje de macros.



Este proyecto se centra en el apartado DOE. En el siguiente apartado se pasa a describir el mismo.

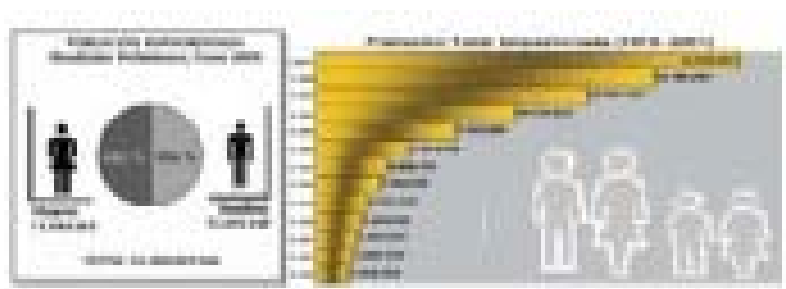
C3.1 DOE. Diseño de experimentos.

Diseñar un experimento significa planear un experimento de modo que reúna la información pertinente al problema bajo investigación.

El diseño de un experimento es la secuencia completa de pasos tomados de antemano para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido.

Un diseño de experimento surge de la necesidad de responder a preguntas como:

- ¿Cómo se va a medir el efecto?, ¿Cuáles son las características a analizar?
- ¿Qué factores afectan las características que se van a analizar?
- ¿Cuáles son los factores que se estudiarán en esta investigación?
- ¿Cuántas veces deberá ejecutarse el experimento?
- ¿Cuál será la forma de análisis?
- ¿A partir de que valores se considera importante el efecto?
-



Los objetivos de un diseño de experimentos son:

- Proporcionar la máxima cantidad de información pertinente al problema bajo investigación.
- El diseño, plan o programa debe ser tan simple como sea posible.
- La investigación debe efectuarse lo más eficientemente posible; ahorrar tiempo, dinero, personal y material experimental. "Proporcionar la máxima cantidad de información al mínimo costo"

El diseño de experimentos consta de 3 principios básicos que se pasan a enumerar a continuación:

1. Reproducción. Proporciona una estimación del error experimental. Permite obtener una estimación más precisa del efecto medio de cualquier factor.
2. Aleatorización. Asignación al azar de tratamiento a las unidades experimentales. Una suposición frecuente en los modelos estadísticos de diseño de experimentos es que las observaciones o los errores en ellas están distribuidos independientemente. La aleatorización hace válida esta suposición
3. Control Local. Cantidad de balanceo, bloqueo y agrupamiento de las unidades experimentales que se emplean en el diseño estadístico adaptado

Un buen DOE debe constar de las siguientes etapas:

- Formulación de hipótesis.
- Proposición de la técnica experimental y el diseño
- Examen de sucesos posibles y referencias en que se basan las razones para la indagación que asegure que el experimento proporcionará la información requerida y en la extensión adecuada.
- Consideración de los posibles resultados desde el punto de vista de los procedimientos estadísticos que se aplicarán y para asegurar que se satisfagan las condiciones necesarias para que sean válidos estos procedimientos
- Ejecución del experimento. Aplicación de las técnicas estadísticas a los resultados experimentales.
- Extracción de conclusiones con medidas de la confiabilidad de las estimaciones generadas.
- Deberá darse cuidadosa consideración a la validez de las conclusiones para la población de objetos o eventos a la cual se van a aplicar.
- Valoración de la investigación completa y contrastación con otras investigaciones del mismo problema o similares.

Es importante reunir toda la información disponible y obtener un enunciado claro del problema. De esta forma definimos el propósito exacto de nuestro diseño. Si se han seguido correctamente los apartados anteriores, finalmente se llega al momento de analizar e interpretar los resultados. Éste apartado requiere de más especificación como la que viene a continuación.

Interpretación de los resultados:

- Considerar todos los datos observados.
- Limitar las conclusiones a deducciones estrictas a partir de la evidencia obtenida.
- Probar, mediante experimentos independientes, las controversias que susciten los datos.
- Llegar a conclusiones, tanto respecto al significado técnico de resultados como respecto a significancia estadística.
- Especificar lo que implican los resultados para su aplicación y para trabajos posteriores.
- Tener en cuenta las limitaciones impuestas por los métodos usados.
- Enunciar los resultados en términos de probabilidades verificables.

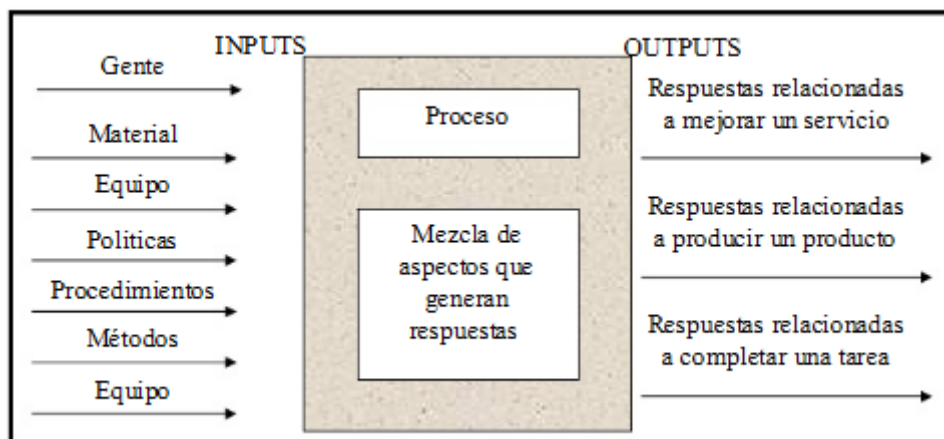
Por otro lado, se debería comentar que los experimentos diseñados estadísticamente tienen algunas ventajas y desventajas que se deberían conocer:

- Se requiere una estrecha colaboración entre los estadísticos y el investigador o científicos con las consiguientes ventajas en el análisis e interpretación de las etapas del programa.
- Se enfatiza respecto a las alternativas anticipadas y respecto a la pre- planeación sistemática, permitiendo aun la ejecución por etapas y la producción única de datos útiles para el análisis en combinaciones posteriores.
- Debe enfocarse la atención a las interrelaciones y a la estimación y cuantificación de fuentes de variabilidad en los resultados.
- El número de pruebas requerido puede determinarse con certeza y a menudo puede reducirse.
- La comparación de los efectos de los cambios es más precisa debido a la agrupación de resultados.

- La exactitud de las conclusiones se conoce con una precisión matemáticamente definida
- Tales diseños y sus análisis, usualmente están acompañados de enunciados basados en el lenguaje técnico del estadístico. Sería significativos a la generalidad de la gente, además, el estadístico no debería subestimar el valor de presentarnos los resultados en forma gráfica. De hecho, siempre debería considerar a la representación gráfica como un paso preliminar de un procedimiento más analítico.
- Muchos diseños estadísticos, especialmente cuando fueron formulados por primera vez, se han criticado como demasiado caros, complicados y que requieren mucho tiempo. Tales críticas, cuando son válidas, deben aceptarse de buena fe y debe hacerse un intento honesto para mejorar la situación, siempre que no sea en detrimento de la solución del problema

Para poder diseñar un experimento hay que proponerse a hacer cambios en los factores (inputs) para poder observar los cambios correspondientes a las respuestas (outputs).

La información obtenida de un buen diseño experimental puede ser utilizada para desarrollar las características de mejora, reduce costos y tiempos asociados al desarrollo del producto, diseño y producción, así como construir modelos matemáticos que se aproximan a la realidad entre los factores y el resultado.

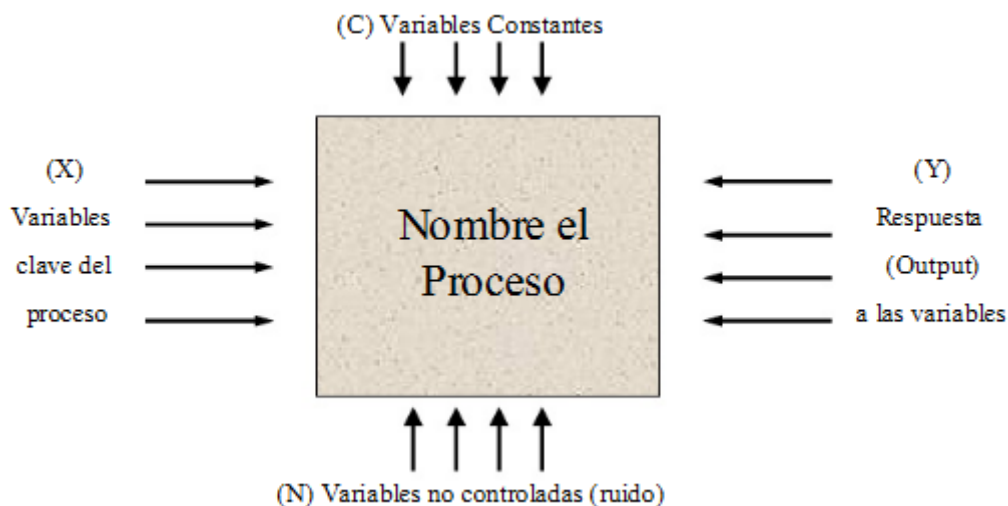


La información obtenida de un diseño experimental adecuado puede ser usada para mejorar las características analizadas; reduce costos y tiempo asociado con el desarrollo del producto, diseño de producción y construye modelos matemáticos que aproximan la verdad entre los factores y los resultados. Estos optimizan procesos, perfecciona los análisis para usarse en las evaluaciones de tolerancia y reduce la variación así como la posibilidad de evitar una respuesta insensible, es decir que se pudiera salir de control.

Un proceso tiene cuatro categorías de variables las cuales deben de estar bien documentadas en un diagrama de causa y efecto:

- *Respuesta a las variables.-* (outputs). Son medidas para evaluar el desempeño de un proceso y/o producto.
- *Controlar variables y mantenerlas constantes.-* Mediante el SOP (procedimiento estándar de la operación).
- *Variables no controladas (Ruido).-* Estas variables no pueden mantenerse constantes ni durante la producción ni cuando es un producto terminado. Esto hace un producto robusto.
- *Variables Clave en el Proceso.-* Son las variables que intentaremos variar durante el experimento para lograr la respuesta de mejora en el producto.

Usando las cuatro categorías de variables, se puede representar un diagrama de proceso más completo, tal y como se observa en la siguiente gráfica:



Se centra ahora en el diseño factorial. Éste permite el estudio simultáneo de los efectos de varios factores que puede haber en una respuesta. Cuando se mejora un experimento guía el nivel de todos los factores simultáneamente permitiendo uno a la vez para el estudio o interacción entre los factores.

También se puede hacer una corrida de diseño de factores completos (que son las combinaciones de los niveles del factor experimental) o una fracción del diseño factorial (son medidas de respuesta a un subgrupo fracción de todas las combinaciones de los niveles del factor experimental)

C3.2 . DOE de 2 niveles. Aplicación en copa cilíndrica

El diseño de experimentos de 2 k (utilizado en este proyecto), es donde cada factor solo tiene dos niveles y no cuenta con un punto central.

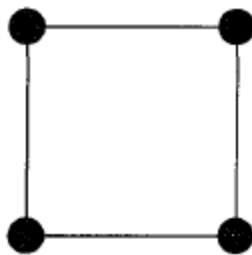
El diseño factorial de dos niveles es usado para guiar futuros experimentos, por ejemplo, cuando se necesita explorar una nueva región donde se supone que un grupo mejor puede existir.

- El diseño factorial de dos niveles puede ser:
 - o Factorial completo que son corridas experimentales que incluyen todas las combinaciones en los niveles de factor.
 - o Factorial fraccionado o fraccional que experimenta corridas que incluyen solo una fracción de todas las posibles corridas

El Diseño Factorial Completo 2k describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen k factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos. Estos experimentos están planteados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos.

Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importante porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación, y porque constituyen la base para otros diseño de gran valor práctico.

El más importante de estos casos especiales ocurre cuando se tienen k factores, cada uno con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos, es decir valores de una magnitud y también pueden ser cualitativos como serían los niveles superior e inferior de un factor o la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se conoce como diseño factorial 2^k .



Representación del diseño factorial 2^k con dos factores.

Para el análisis de esta clase de diseño se supone, que los factores son fijos, que los diseños son completamente aleatorizados y que se satisface la suposición de normalidad.

El diseño 2^k es particularmente útil en las primeras fases del trabajo experimental, cuando es probable que haya muchos factores por investigar. Conlleva el menor número de corridas con las cuales pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo.

Debido a que sólo hay dos niveles para cada factor, debe suponerse que la respuesta es aproximadamente lineal en el intervalo de los niveles elegidos de los factores.

En nuestro caso se realiza un 2^k con $k=5$. A continuación se citan los 5 valores con su rango:

- Radio Matriz, R_m = de 2'5 a 5'5 mm.
- Radio Punzón, R_p = de 2'5 a 5'5 mm.
- Razón Límite de Embutido, RLE = de 1'8 a 2.
- Fuerza del pisador, BHF = de 5000 a 9000 kg.
- Holgura, H = del 10% al 20%

Factor	Nombre	Tipo	Bajo	Alto
A	RLE	Texto	1,8	2
B	BHF	Texto	5000	9000
C	Rm	Texto	2,5	5,5
D	Rp	Texto	2,5	5,5
E	Holgura	Texto	0,08	0,16

Factores declarados en Minitab

OrdenCorrida	RLE	BHF	Rm	Rp	Holgura	ThinningMed	ThinningMin
1	1,8	5000	2,5	2,5	0,08	13,28	13,75
2	2	5000	2,5	2,5	0,08	14,49	14,90
3	1,8	9000	2,5	2,5	0,08	14,21	14,74
4	2	9000	2,5	2,5	0,08	17,05	17,72
5	1,8	5000	5,5	2,5	0,08	6,69	7,38
6	2	5000	5,5	2,5	0,08	8,88	9,14
7	1,8	9000	5,5	2,5	0,08	8,56	9,06
8	2	9000	5,5	2,5	0,08	10,32	10,45
9	1,8	5000	2,5	5,5	0,08	13,43	13,99
10	2	5000	2,5	5,5	0,08	14,80	15,59
11	1,8	9000	2,5	5,5	0,08	14,91	15,35
12	2	9000	2,5	5,5	0,08	16,23	17,04
13	1,8	5000	5,5	5,5	0,08	6,59	7,24
14	2	5000	5,5	5,5	0,08	8,58	8,74
15	1,8	9000	5,5	5,5	0,08	8,19	8,76
16	2	9000	5,5	5,5	0,08	10,59	10,75
17	1,8	5000	2,5	2,5	0,16	13,04	13,58
18	2	5000	2,5	2,5	0,16	15,75	16,16
19	1,8	9000	2,5	2,5	0,16	15,70	16,21
20	2	9000	2,5	2,5	0,16	16,31	16,99
21	1,8	5000	5,5	2,5	0,16	6,54	7,19
22	2	5000	5,5	2,5	0,16	8,82	9,00
23	1,8	9000	5,5	2,5	0,16	8,42	8,86
24	2	9000	5,5	2,5	0,16	10,37	10,69
25	1,8	5000	2,5	5,5	0,16	13,50	14,32
26	2	5000	2,5	5,5	0,16	15,11	15,39
27	1,8	9000	2,5	5,5	0,16	14,97	15,29
28	2	9000	2,5	5,5	0,16	16,68	17,57
29	1,8	5000	5,5	5,5	0,16	6,68	7,17
30	2	5000	5,5	5,5	0,16	8,75	8,94
31	1,8	9000	5,5	5,5	0,16	8,52	8,91
32	2	9000	5,5	5,5	0,16	10,29	10,43

Representación de las 32 corridas. Extraído de Minitab

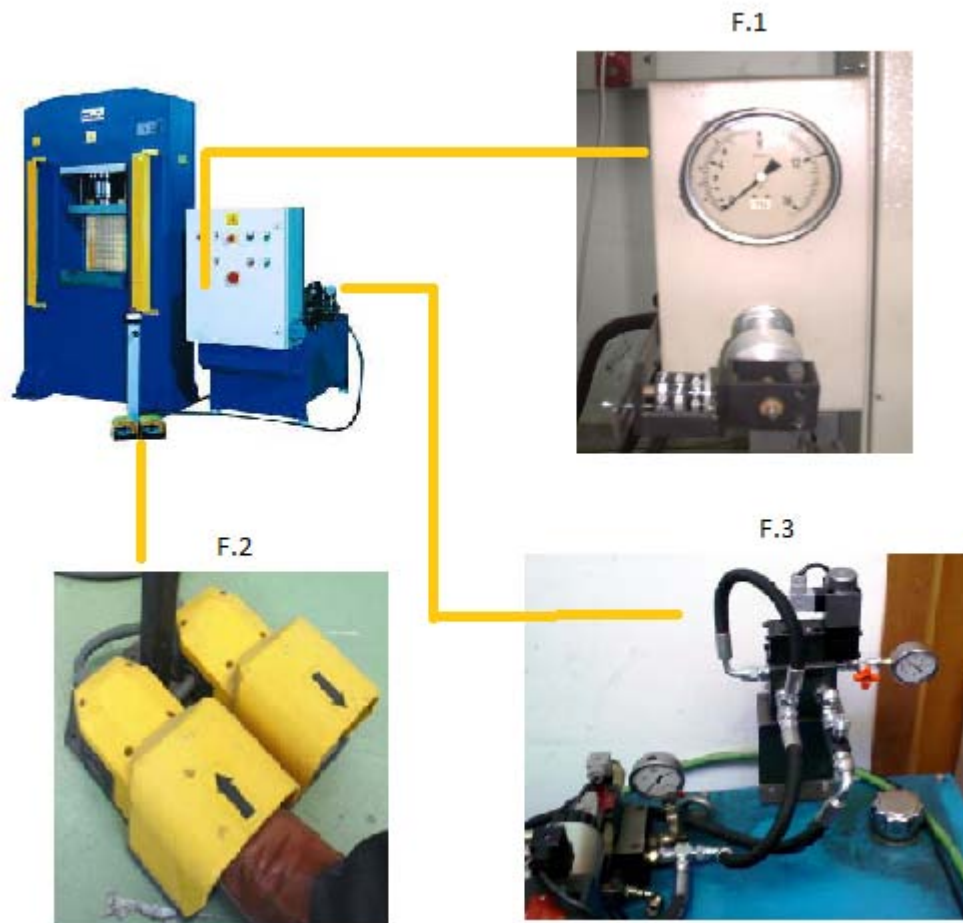
En el anexo E se analizan todos los resultados de este Diseño de Experimentos.

Anexo D. Procedimiento experimental. Ensayos en prensa y captura de datos.

D.1 Elementos principales

A continuación se pasarán a describir en detalle los principales elementos para la realización de los ensayos. Aunque los dos bloques principales serían la prensa y el Sensor PCD-300 con el cual podemos monitorizar los valores que no dan los ensayos, no se debe olvidar la importancia de las 3 células de carga en las velas, la célula de carga en el punzón, el programa KIOWA para visualizar datos o la pistola y su correspondiente programa con los que se captura directamente de la pieza los adelgazamientos que nos interesa medir.

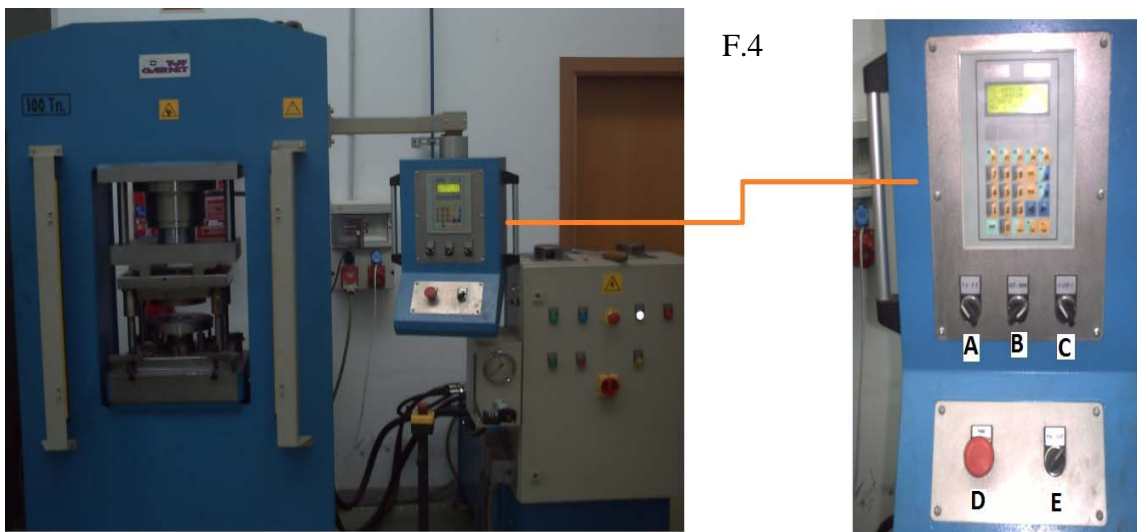
D1.1 La prensa y sus principales componentes



F.1: En esta imagen se observa la pantalla del manómetro de la prensa. Ante la imposibilidad de controlar la presión ejercida de una forma más detallada, se le incorpora esa ruleta de tres dígitos con el fin de medir las presiones con las células de carga (muchacha mayor precisión) y anotar el dígito correspondiente a cada carga. De esta forma obtenemos la repetitividad deseada.

F.2: En manual se pisa para subir o bajar el cilindro superior. En automático se pisa para comenzar a ejecutar el programa.

F.3: En esta imagen se observa el grupo hidráulico



F.4: En la imagen F.4 se muestra el panel de control. Debajo de la pantalla y el teclado se encuentran cinco elementos marcados que se deben conocer:

- * A: Selector de velocidad. Actúa sobre el cilindro principal pudiendo seleccionar entre dos velocidades.
- * B: Modo de funcionamiento. Selector de dos posiciones para elegir entre modo manual o automático.
- * C: Actuador de cojín. Para activar o desactivar que trabaje el modo cojín. Siempre en modo automático. En modo manual no tiene ninguna función.
- * D: Seta de emergencia: Apaga la máquina al pulsarla. Girarla para liberarla de nuevo y poder volver a enchufar la máquina.
- * E: Selección cilindro superior o inferior. Cuando se maneja en manual, desde este selector elegimos mover con el pedal el cilindro superior o inferior.

F.5



F.5: En esta imagen podemos observar nombrado con la letra G el cuadro eléctrico. Sus elementos principales son los siguientes:

<p>Testigos luminosos. El verde encendido cuando está en marcha. El azul parpadea cuando está en manual.</p>	<p>Seta de emergencia</p>	<p>Testigos luminosos. El blanco encendido siempre cuando le abrimos el interruptor general. El rojo en caso de avería</p>
<p>Verde para poner en marcha la máquina. Rojo para detener la misma.</p>	<p>Interruptor general</p>	<p>Botón de rearme. Conveniente siempre rearmar cuando se realizan cambios en programas o tras un paro de emergencia</p>

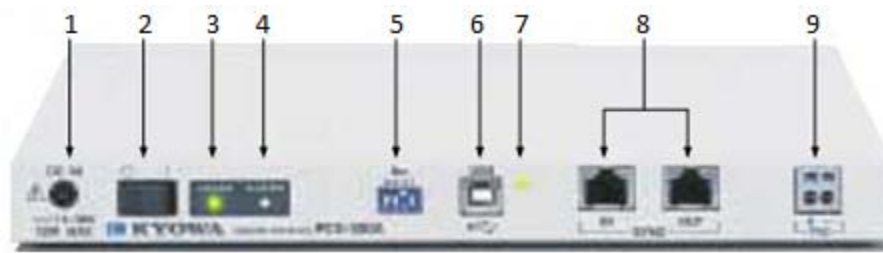
F.6



F.6: En esta imagen se ve el troquel completo. Se observa la matriz en la parte superior. El pisador apoyado en las células de carga montadas sobre las velas. Y Por último el punzón en la parte inferior. Aún así merece la pena ver en detalle alguno de estos componentes:

	<p>Vista superior e inferior del punzón. Su alineación se realiza mediante el ajuste de los tornillos. El hueco inferior central es donde queda alojada la célula de carga para poder medir la presión ejercida durante el embutido.</p>
	<p>A la izquierda de la imagen se ven las seis velas. Sobre tres de ellas irán posicionadas las células de carga. A la derecha de la imagen se ven las cuatro bridas con sus respectivos tornillos en T para fijar el soporte principal</p>

	<p>Imagen ampliada de la parte inferior del punzón donde se ve como queda alojada la célula de carga.</p>
	<p>Imagen de una de las tres células de carga que quedan depositadas sobre las velas. Cada uno mide hasta un rango máximo de 4000 Kg.</p>

D1.2 Sensor PCD-300

- | | |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1.- Conector adaptador de corriente | 6.- Conector USB |
| 2.- Botón de encendido/apagado | 7.- Led USB |
| 3.- Luz de indicación de encendido | 8.- Conectores de sincronización de entrada y salida |
| 4.- Led master | |
| 5.- Identificador de dispositivos | 9.- Terminal de señal |



- 10.- Terminal de dispositivos de entrada. Hay cuatro canales.
- 11.- Botón MODE
- 12.- Toma a tierra

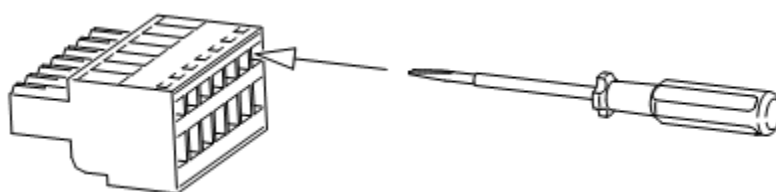


Croquis de la instalación

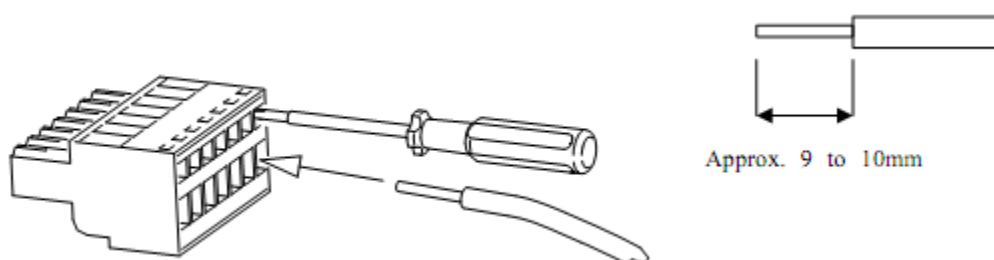
D1.2.1 Conexión de las galgas al PCD-300

Para conectar los medidores de tensión, galgas, etc., despegar el recubrimiento del cable alrededor de 9 a 10 mm por un extremo y a continuación conecte.

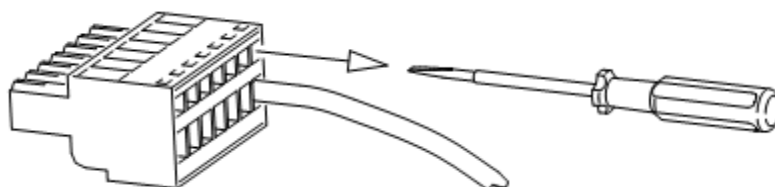
- 1.- Inserte el destornillador pequeño en el agujero cuadrado del terminal de entrada.



- 2.- Con el destornillador insertado en el agujero cuadrado, insertar el cable por el extremo pelado en el terminal de entrada.



- 3.- Mientras mantiene el cable, extraiga el destornillador el agujero cuadrado.



- 4.- Suavemente tire del cable para comprobar si está insertado de forma segura.

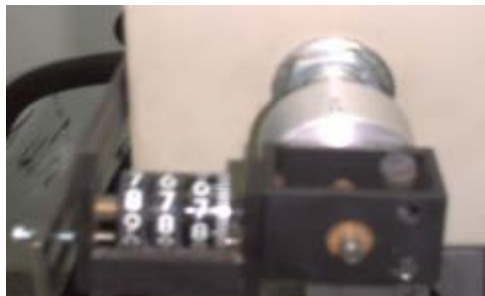
D.2 Pasos para realizar el ensayo

En los siguientes puntos se explican los pasos que son necesarios seguir para realizar correctamente el ensayo:

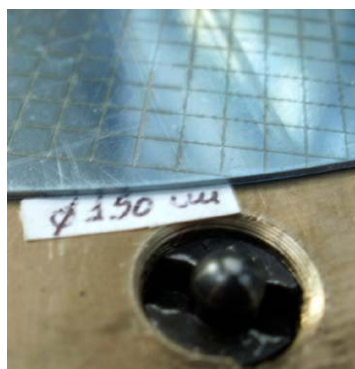
- 1- Realizar la programación de la prensa del ensayo que queremos realizar. En el apartado D.3 se describe cómo hacerlo. Se recomienda primero probar en vacío para comprobar que el programa se ejecuta correctamente.



- 2- En vacío verificar que las presiones de embutido son las adecuadas visionando en pantalla los valores. Regular con los tres dígitos de presión instalados en la prensa



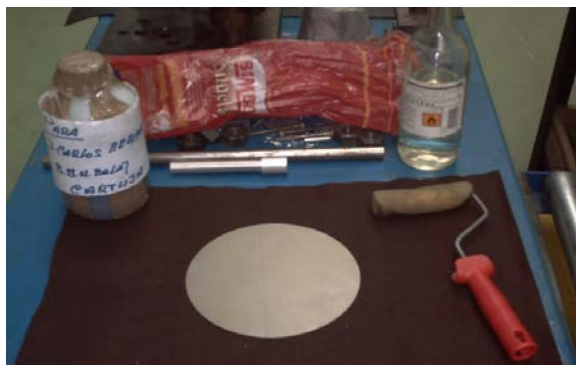
- 3- Tener marcado en el pisador donde colocar la chapa centrada. Para conseguir esto hay colocados unos pequeños tetones para la chapa de 200mm y un marcado de pintura describiendo la silueta de la chapa para el caso de 180mm.



- 4- Colocar el pisador en posición de trabajo. Antes haber colocado las velas con sus células de carga correctamente.



- 5- Limpiar con acetona la preforma a embutir. Posteriormente lubricarla con el rodillo destinado a esta función.



- 6- Colocar preforma centrada en el pisador.



- 7- Activar el programa KYOWA tras haberlo preparado. Colocar en modo monitor o grabación para poder observar las gráficas del ensayo.
- 8- Prensa en modo automático y pulsar pedal para empezar a ejecutar el programa.

- 9- Extraer la chapa ya embutida y limpiar el lubricante. Etiquetarla con todos datos necesarios para identificar el tipo de ensayo en el futuro
- 10- Después ya sólo quedará medir con la pistola de captura de datos en la zona requerida para proseguir con el análisis de resultados.



D.3 Funcionamiento de la prensa

Según muestra el manual de la prensa, para la utilización de la misma hay que seguir unos pasos. Así pues, a continuación se muestra la puesta en marcha de la máquina.

En primer lugar, realizar una comprobación preliminar del nivel de aceite del grupo hidráulico por el visor situado en el tanque y ver que no está enclavada ninguna seta de emergencia.

Una vez hechas las comprobaciones preliminares se procede a la puesta en marcha; primero se debe conectar el cuadro eléctrico por medio del interruptor general, accionar el pulsador amarillo de rearme y el pulsador verde de puesta en marcha del motor eléctrico del grupo hidráulico.

Los paros de emergencia y la cortina fotoeléctrica detienen todo el funcionamiento de la prensa. Para continuar después de un paro de emergencia, debe desenclavarse efectuando un giro del pulsador y realizar nuevamente la puesta en marcha, presionar el pulsador de rearme y el pulsador verde de puesta en marcha.

Para parar la prensa, debe actuarse sobre el pulsador rojo de paro del motor eléctrico del grupo hidráulica y desconectar el interruptor principal.

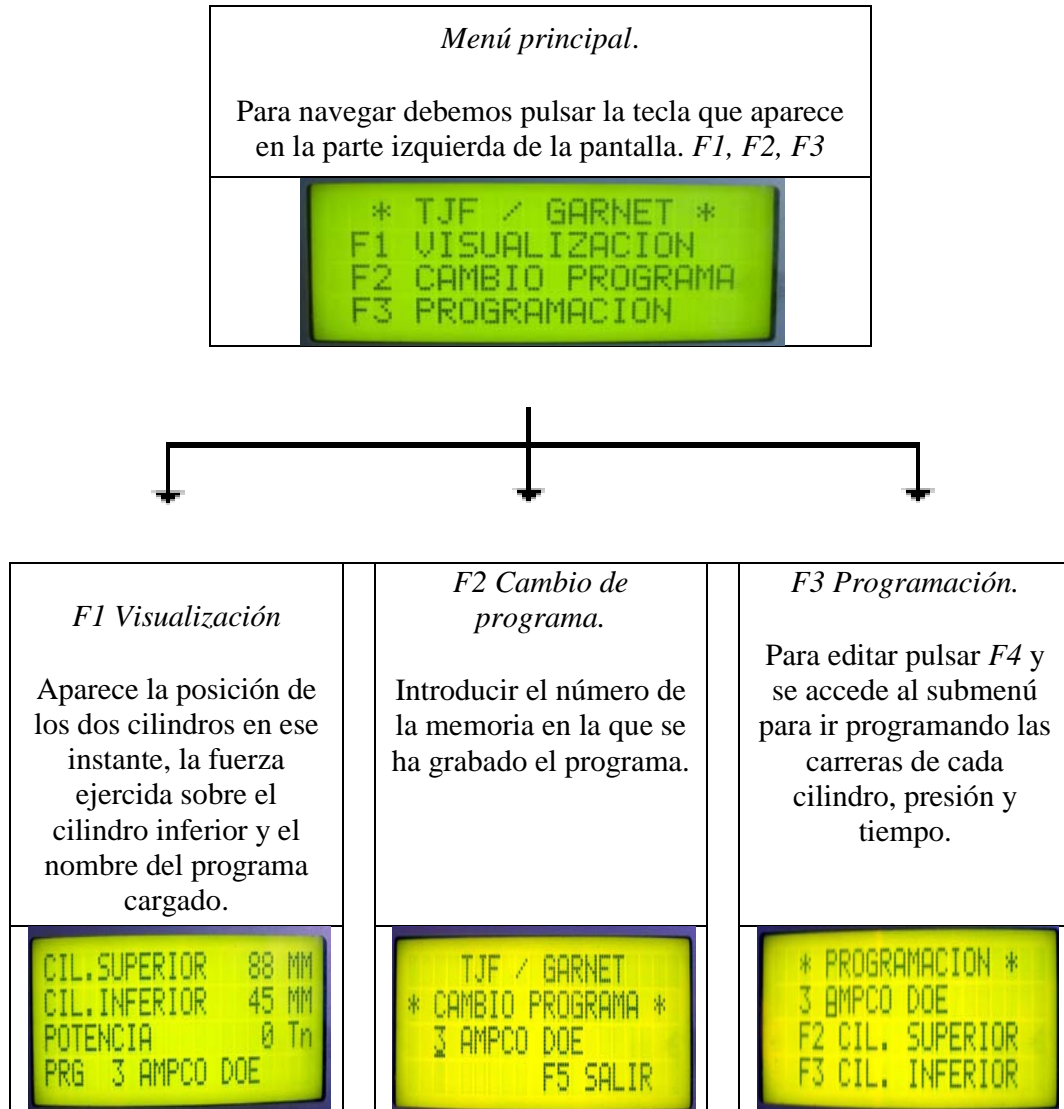
- En cuanto a su funcionamiento manual:

- Posicionar el selector de funcionamiento en la posición MAN, parpadeara el piloto de automático.
- Para actuar el cilindro superior, posicionar el selector de cilindro en la posición PAL. El cilindro inferior, posicionar en EXP.
- Por medio de los pedales de SUBIR/BAJAR para efectuar la maniobra seleccionada.

- En cuanto a su funcionamiento automático:

- Posicionar el selector de funcionamiento en la posición AUT. El selector EXP/PAL no tiene ninguna utilidad.
- Para iniciar la maniobra programada, es preciso pulsar el pedal de descenso, el pedal de subida no tiene ninguna utilidad. .
- Cada pulsación del pedal de descenso efectúa una sola maniobra, es preciso pulsar nuevamente para realizar otra maniobra, una vez realizada la anterior,
- La prensa actuara según la programación indicada en la pantalla.
- El selector de anulación del expulsor, en la posición 0, anula el cojín independientemente de la programación del mismo.

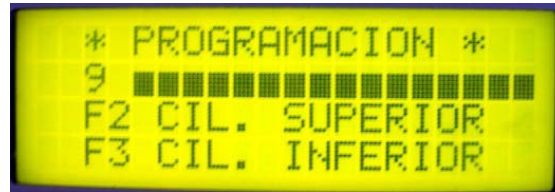
D 3.1 Programación



Antes de comenzar a programar hay que elegir en qué posición de la memoria se desea guardar. Hay hasta un total de 99 módulos para programar. Para hacerlo simplemente desde el menú inicial se selecciona cambio de programa y ahí se introduce la nueva ubicación.

Es necesario como siempre en este control, pulsar enter para introducir el número y pulsarlo de nuevo para guardar. También se puede introducir el nombre del programa a continuación.

Una vez realizado este sencillo paso, se pulsa F5 para salir. Se vuelve al menú principal y aquí seleccionaremos la opción programación para comenzar a introducir los parámetros necesarios.

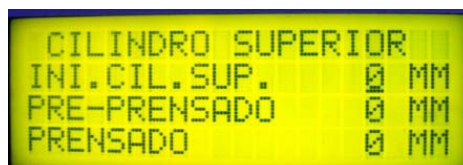


Así pues dentro de este menú se pulsara primero F2 para programar el cilindro superior. Posteriormente saldremos con F5 y pulsaremos F3 para programar el cilindro inferior.

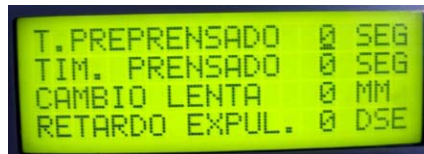
Para meter cada uno de los datos habrá que proceder de la misma manera, enter para modificar o crear y enter de nuevo para guardar.

- Programación del cilindro superior F2

- PRE-PRENSADO. Distancia del punto de partida al punto de paro del pre prensado.
- PRENSADO. Distancia del punto de partida al punto de paro del prensado.
- INI.CIL.SUP. Punto de partida del ciclo del cilindro superior



- T.PREPENSADO. Tiempo de continuación de presión del cilindro, antes de seguir con el ciclo de prensado.
- TIM.PRENSADO. Tiempo de continuación de presión del cilindro, antes de seguir con el ciclo de descompresión y retorno.
- CAMBIO LENTA. Espacio en que el cilindro se desplazara a velocidad lenta para el correcto posicionado en los puntos de paro de avance de pre prensado, prensado y retroceso al punto inicial. Se aconseja un mínimo de 5 mm
- RETARDO EXPUL. Tiempo de retardo en la salida del expulsor o cojín.



- PRE-PRENSADO. Presión máxima en el ciclo de pre prensado.
- PRENSADO. Presión máxima en el ciclo de prensado.
- DESCOMPRESIÓN. Tiempo de descompresión del cilindro antes de la maniobra de retroceso, en décimas de segundo. Tiene un mínimo de 4 décimas de segundo.
Para ir pasando una línea a otra, pulsar



- Programación del cilindro inferior F3

- **INI.CIL.EXP.** Distancia del punto de partida al punto de paro de descenso del cilindro, en funcionamiento como expulsor, como cojín no tiene utilidad.
- **EXPULSOR.** Distancia del punto de partida al punto de paro de salida del cilindro. En funcionamiento como expulsor o cojín.
Tiempo que permanece en el punto de expulsión el cilindro, antes del ciclo de retorno, en funcionamiento como expulsor.
- **TRABAJO DE EXPULSOR.** Existe la posibilidad de seleccionar el funcionamiento del cilindro como *expulsor* o *cojín*, para ello pulsar *ENTER* para editar, *PG DN* o *PG UP* para cambiar y pulsar nuevamente *ENTER*.

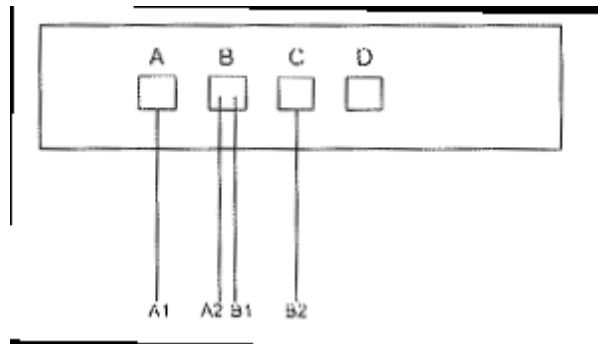


Realizar reset siempre que se modifique un programa o se cree uno nuevo. Apagarla y encenderla pulsando reset. De esta forma la máquina tendrá en cuenta los nuevos parámetros introducidos.

D.4 Programa KYOWA PCD

El siguiente paso es acceder el programa informático encargado de recibir las señales de las galgas y transformarlas para obtener una gráfica.

Se conecta el captador de señal PCD-300 a la red eléctrica y al ordenador mediante el cable USB. Una vez conectado se enciende dicho dispositivo y el ordenador. Se colocan los cables de las galgas en el canal 3 y 4 según el siguiente esquema:

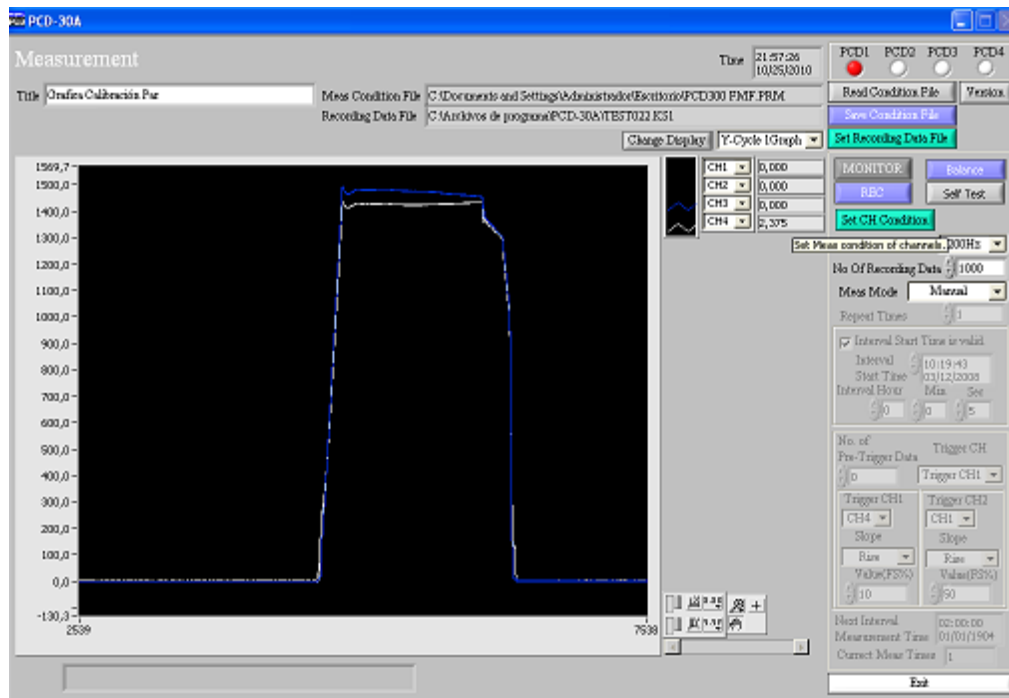


A1- rojo, A2- verde, B1- negro, B2 – blanco

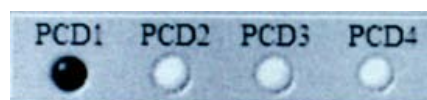
Una vez preparado lo anterior, se abre el programa *KYOWA PCD* mediante el icono siguiente:



Al acceder al programa la pantalla principal tiene este aspecto:



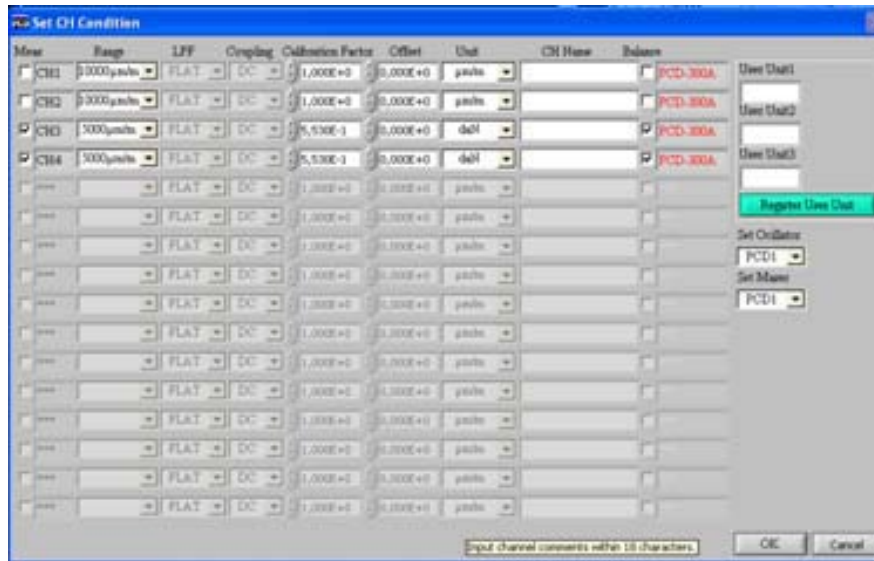
Prestar atención a los indicadores PCD donde muestra con una luz roja que el dispositivo está en funcionamiento y ha sido reconocido por el ordenador.



Una vez que el ordenador y el equipo están conectados, se debe proceder al ajuste del equipo. Para ello se pincha sobre el botón *Set CH Conditions*.



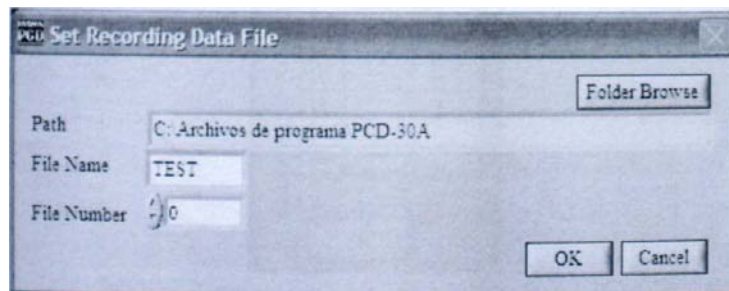
Se abrirá la siguiente pantalla:



- Elegimos que canales queremos que mida el equipo seleccionándolos en la primera columna. Pinchar en las pestañas CH1, CH2, CH3 y/o CH4.
- El rango de medida se puede dejar al máximo: 10000µm/m
- El factor de calibración de las células de carga es la constante K , se introduce según el valor extraído en la calibración previa. En nuestro caso introducimos $c1 = 3,08$ (célula grande del punzón), $c2 = 1,2$, $c3 = 1,33$ y $c4 = 1,4$ (éstas son las tres células de carga de las velas).
- A continuación en la ventana de unidades (*Unit*) se elige la magnitud que se desea medir, fuerza.
- En la siguiente ventana se escribe el nombre del canal que se va a medir, en este caso “*Presión*”.
- La pestaña de Balance se deberá activar
- En las ventanas *Set Oscillator* y *Set Master*, se debe seleccionar el mismo nombre que el indicador activado.
- En la ventana principal antes de empezar a capturar los datos hay una pestaña donde indica las mediciones que realizará por segundo. Esta ventana tiene un valor por defecto de 100Hz. Este valor en principio es el seleccionado.

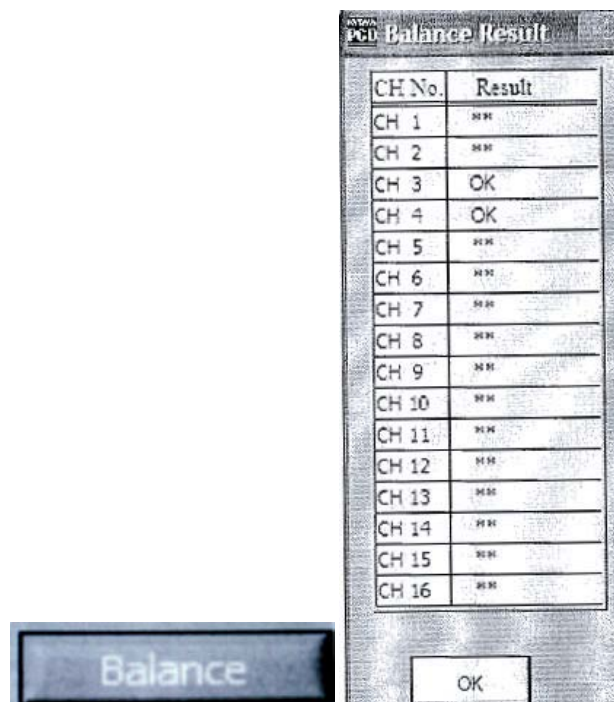
Realizados todos estos pasos se pulsa el botón *ok* y automáticamente se cierra la ventana.

Por otro lado, si queremos guardar los datos, en la ventana principal se pulsa el botón “set recording data file” y se accede a la siguiente ventana.



En esta pantalla podemos cambiar el nombre del archivo con que se guardarán los datos, y si pulsamos el botón *Folder Browse* podemos cambiar el lugar donde almacena dichos datos.

Antes de iniciar a medir los datos es importante realizar un Balance, para ello pulsamos el botón *Balance* de la ventana principal y aparece la siguiente pantalla:

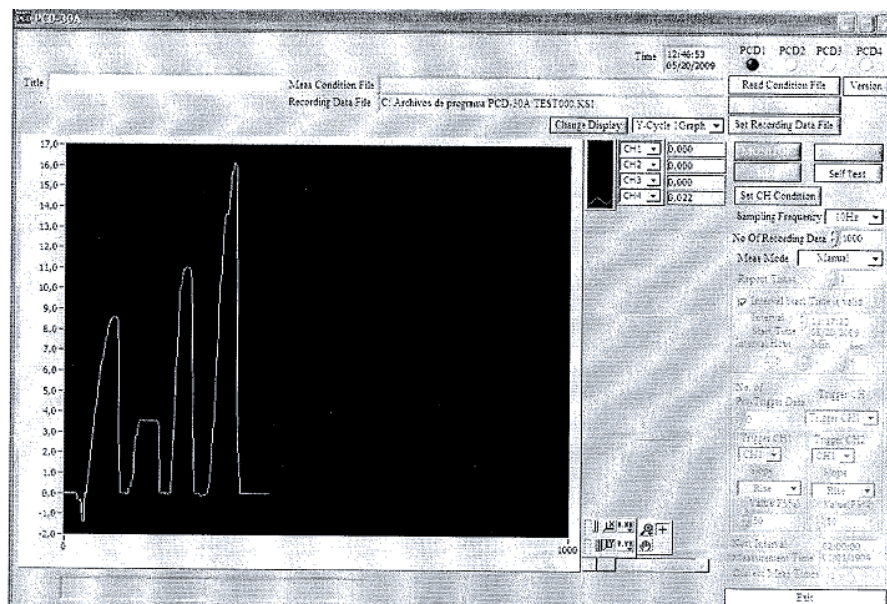


Debe aparecer en los canales que se estén utilizando como resultado (*Result*) un Ok que indique que todo está listo para comenzar a medir.

Para comenzar a medir se debe pulsar el botón *MONITOR* en la ventana principal



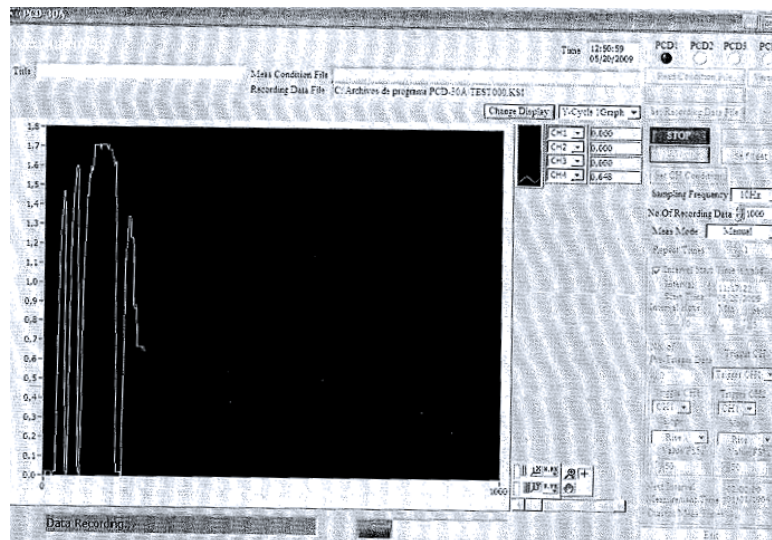
Y se empezarán a visualizar los valores en una gráfica a tiempo real.



Para grabar los valores de la prueba hay que pulsar el botón de *REC*



Aparecerá en la parte inferior de la ventana principal una barra iluminada de color rojo que indica que los datos se están guardando.



Una vez transcurrido el tiempo y se desee parar la grabación, se pulsa el botón de Stop.



De este modo tenemos guardados los datos de nuestro ensayo.

Por último, se procede a convertir estos ficheros a un fichero compatible con Excel, para así poder trabajar con los datos.

Para ello debemos entrar en la aplicación del programa siguiendo la siguiente ruta:

Inicio —► Todos los Programas —► PCD 300 —► Reproducing Data

D.5 Captura datos de la retícula

Para extraer el adelgazamiento real de nuestros ensayos, se utiliza el sistema de análisis de cuadrícula FMTI. Se considera este método adecuado por su sencillez y porque no daña nuestras probetas. Debido a que la tensión de cizalladura borra la cuadrícula por la parte exterior de la pared, se toman las medidas por el interior, ya que el resultado es evidente que será el mismo.

Para facilitar el proceso se dan dos cortes a la pared y se levanta la pared que abarca algo más de 45 grados. De esta forma tomaremos en las medidas todas las posibilidades que aporta la dirección de laminación.



Midiendo en la Zona de estudio para medir el adelgazamiento.



Para obtenerse un punto mediante el analizador el programa necesita varios pasos previos:

- Primero se realiza la calibración de la cuadrícula, realizando varias mediciones de la misma sin deformar, indicándole la longitud y el grosor de la línea de marcado.
- Otra información que necesita el programa de medición son las propiedades mecánicas del material, obtenidas en el ensayo de tracción.

Entonces se captura una imagen del cuadrado deformado' (romboide). El programa detecta automática o manualmente los bordes del romboide, inscribiendo dentro de él una elipse, cuyos semiejes permiten calcular las deformaciones mayor y menor.

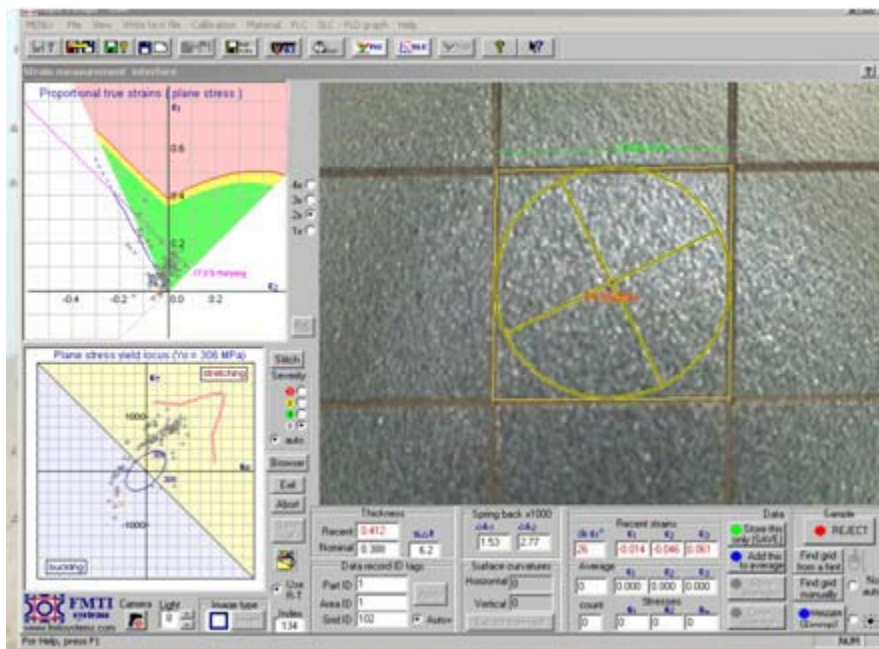


Imagen del programa de captura con el analizador de retículas FMTI 100U

Después se comparan estos semiejes con el radio del círculo inscrito, medido en la calibración y se obtienen las correspondientes elongaciones, colocando el punto correspondiente dentro del diagrama.

Analizadas todas las probetas de distinto ancho, que generan el barrido en los dos cuadrantes, se dispone de un conjunto de puntos, que también pueden ser introducidos en una hoja de cálculo.

Es importante resaltar sobre el analizador de retículas que la exactitud de las mediciones de tensión puede ser $\pm 0,5\%$ en tensiones ingenieriles.

Sin embargo, la exactitud depende de la calidad de la cuadrícula en sí. Normalmente, si un rodillo se utiliza durante el proceso de electro-grabado, la plantilla se alarga en una dirección por alrededor de 2%, lo que afecta a la exactitud de las mediciones de la deformación mediante técnicas de análisis de red de círculos (CGA) o cuadrados (PEG).

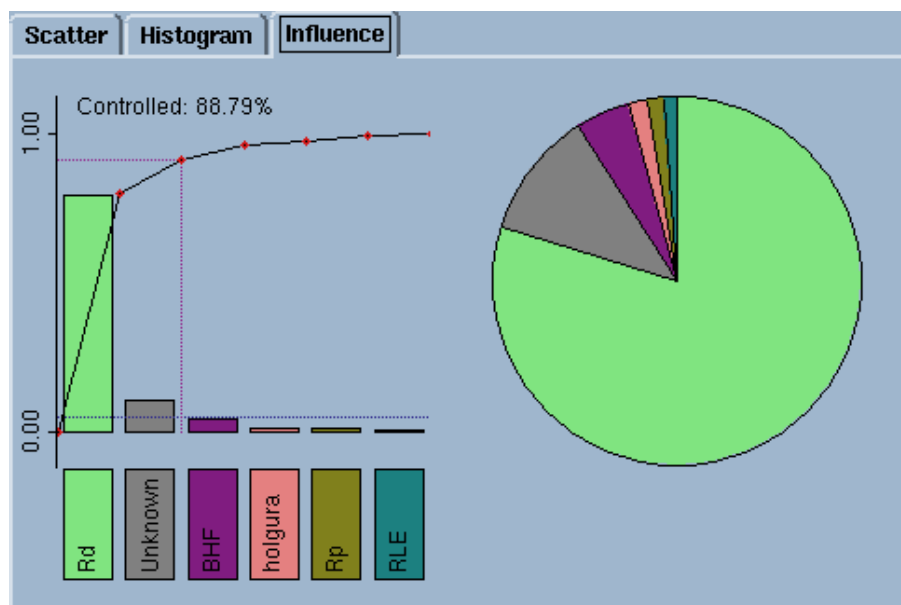
El sistema de análisis de cuadrícula FMTI realiza medidas de tensión basadas en la digitalización de la cuadrícula proyectada sobre la superficie plana del sensor CCD una cámara digital. La posición de la cámara, la distancia de la lente a la superficie cuadrículada y la curvatura de la superficie cuadrículada afecta a la forma y a la magnificación de la imagen. Este documento presenta los resultados de una evaluación experimental de los efectos de la posición del analizador de cuadrícula con respecto al error de medición de la tensión.

Anexo E. Resultados.

E.1 Análisis de resultados de la simulación

Tras realizar la simulación en Autoform, se procede a realizar el análisis, mediante el estudio de las siguientes gráficas, las cuales muestran claramente las conclusiones obtenidas.

- DIAGRAMA SECTOR

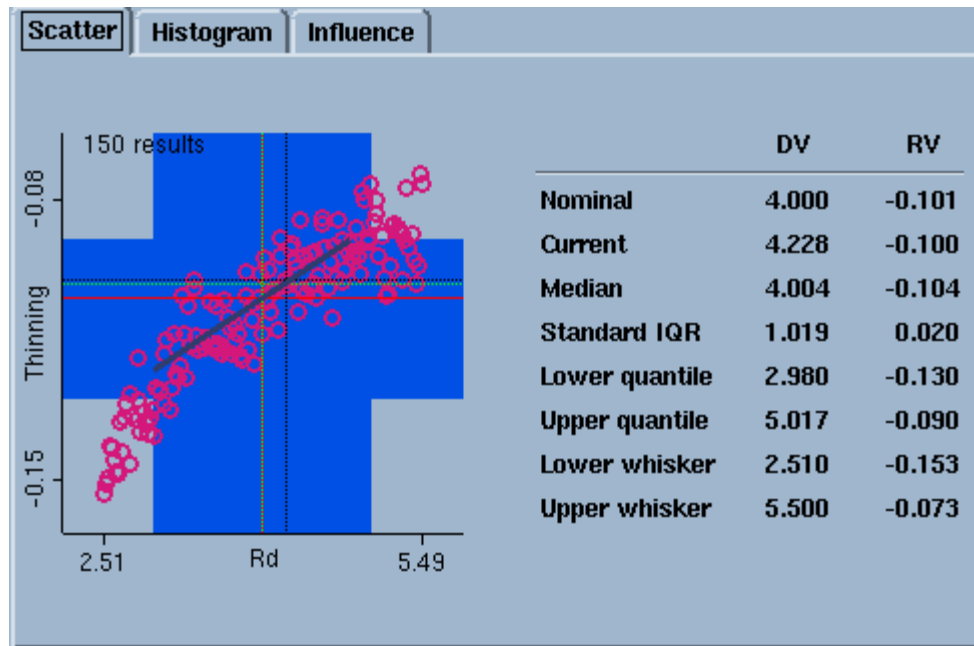


En este diagrama de sector, se muestra claramente la influencia de cada uno de los factores. Se observa que el color verde claro, correspondiente al radio de la matriz, predomina absolutamente sobre el resto. Esto quiere decir que este factor es el más influyente sobre la variable de salida.

Por otro lado, vemos que el segundo sector mayor, se corresponde con el color gris, correspondiente a factores desconocidos tales como el denominado ruido por ejemplo, elementos o factores, los cuales no podemos controlar. Así pues, estos dos serían los que habría que tener más en cuenta.

Para finalizar y a modo de comentario, decir también, que el siguiente factor que resultaría más relevante, sería el BHF, aunque este no llega a superar la línea de puntos que marca los factores de una relevancia importante.

- DIAGRAMA SCATTER



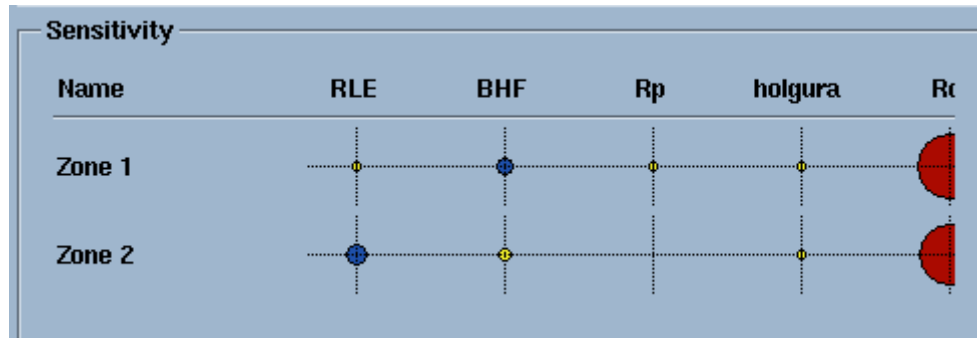
Tras ver en el diagrama de sectores que el Rd es nuestro factor significativo, se pasa a analizar el Scatter del mismo.

El Scatter relaciona la variable de respuesta (thinning) con la variable de diseño seleccionada (Rd). Así pues, observando la línea de tendencia se concluye que a mayor Rd se produce menor adelgazamiento.

La cruz marca el límite de especificación superior e inferior. Se identifica si existe un rango de trabajo estable y se establece una ventana de proceso (línea negra horizontal). De esta forma se establecería el ruido

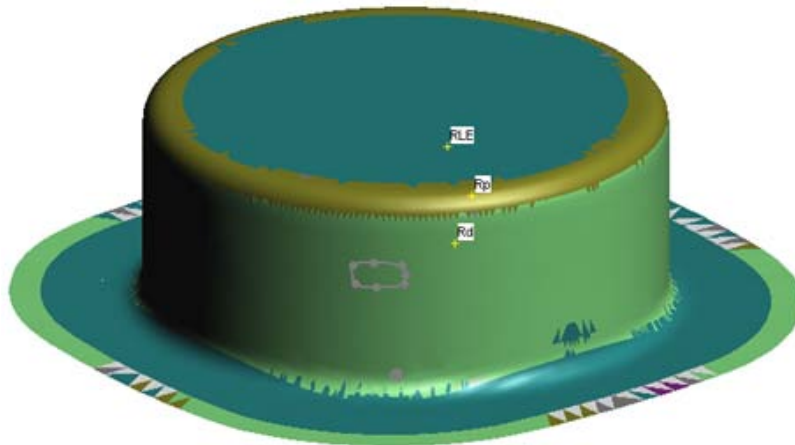
- Cada círculo rojo muestra cada simulación.
- La línea roja muestra el valor de la mediana.
- Las áreas azules muestran el 68% de los datos (IQR normal)
- La línea verde discontinua, muestra el valor nominal de simulación
- Línea negra discontinua delgada, muestra el valor actual de las simulaciones
- Línea gris gruesa, muestra la tendencia (sensibilidad)

- DIAGRAMA DE SENSIBILIDAD



En este se puede observar una vez más la influencia de cada factor. El área de cada uno de ellos denota su influencia en la variable respuesta. De nuevo se observa que para las zonas seleccionadas (las de mayor adelgazamiento), la variable Rd, radio de la matriz, es la que más influye, predominando de forma abultada sobre el resto

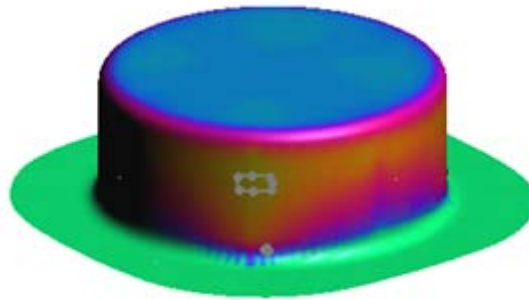
- DIAGRAMA DE VARIABLE PREDOMINANTE



En este diagrama observamos en cada pare de nuestra probeta, que variable es la que más le influye. Vemos que en la zona de la pared, donde se darán los máximos adelgazamientos, una vez más la variable dominante es el radio de la matriz.

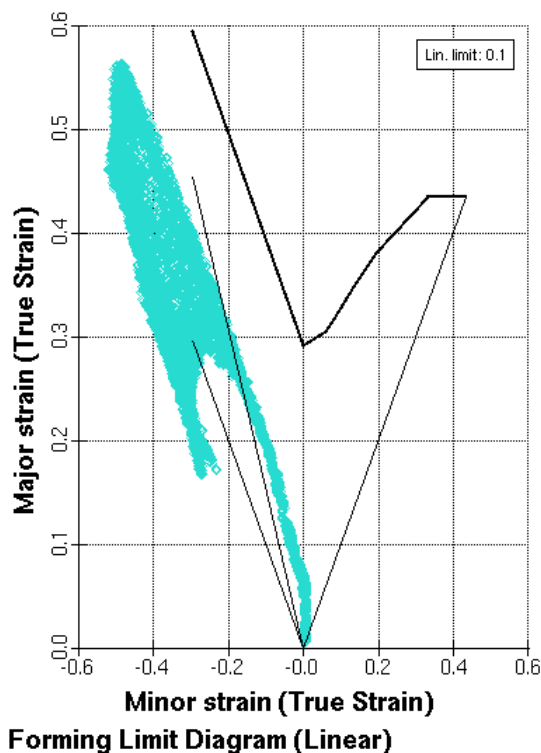
En la zona del radio predominaría el radio del punzón, mientras que en la zona de la base predomina el RLE

- RESULTADO DE TENSIONES DE LA PROBETA EMBUTIDA



Aquí observamos de color amarillo las zonas donde se concentran mayores tensiones. Se puede observar que habrá una zona con mayor sollicitación cada 45 grados. Ahí es donde se darán nuestros mayores adelgazamientos. En cuanto a la altura más crítica en la pared, se da en el área encerrada con la línea gris. A unos 14 mm de la parte más alta. En esa zona es donde se tomarán posteriormente medidas reales en nuestras piezas embutidas.

- DIAGRAMA LÍMITE DE CONFORMADO



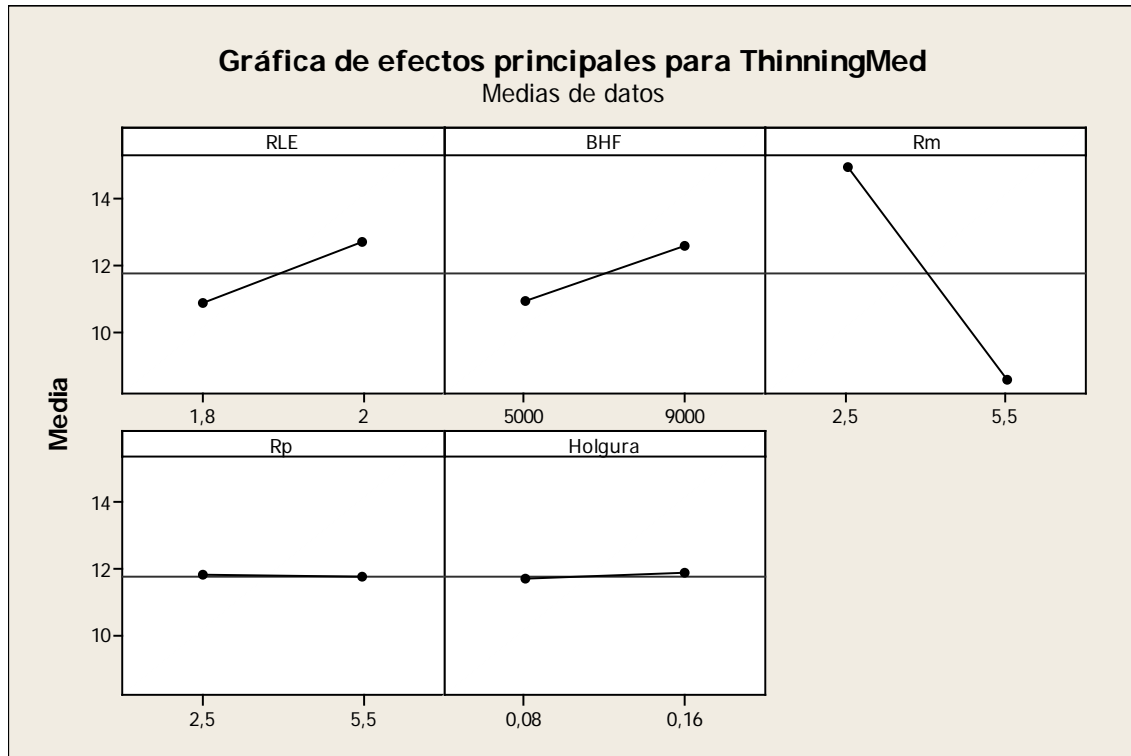
En este diagrama observamos que ningún punto, y por lo tanto ninguna simulación supera la línea límite de conformado. Es decir, no hay ningún punto en la zona de falla, donde rompería la probeta. Así pues, según esta simulación se extrae la conclusión de que no debería llegar la rotura ninguna de nuestras piezas a la hora de su conformación en la prensa.

E.2 Análisis de resultados del estudio estadístico

Tras introducir los datos en Minitab para crear un diseño de experimentos, las gráficas resultantes son las que se muestran a continuación. En las próximas hojas se van mostrando y analizando cada una de ellas.

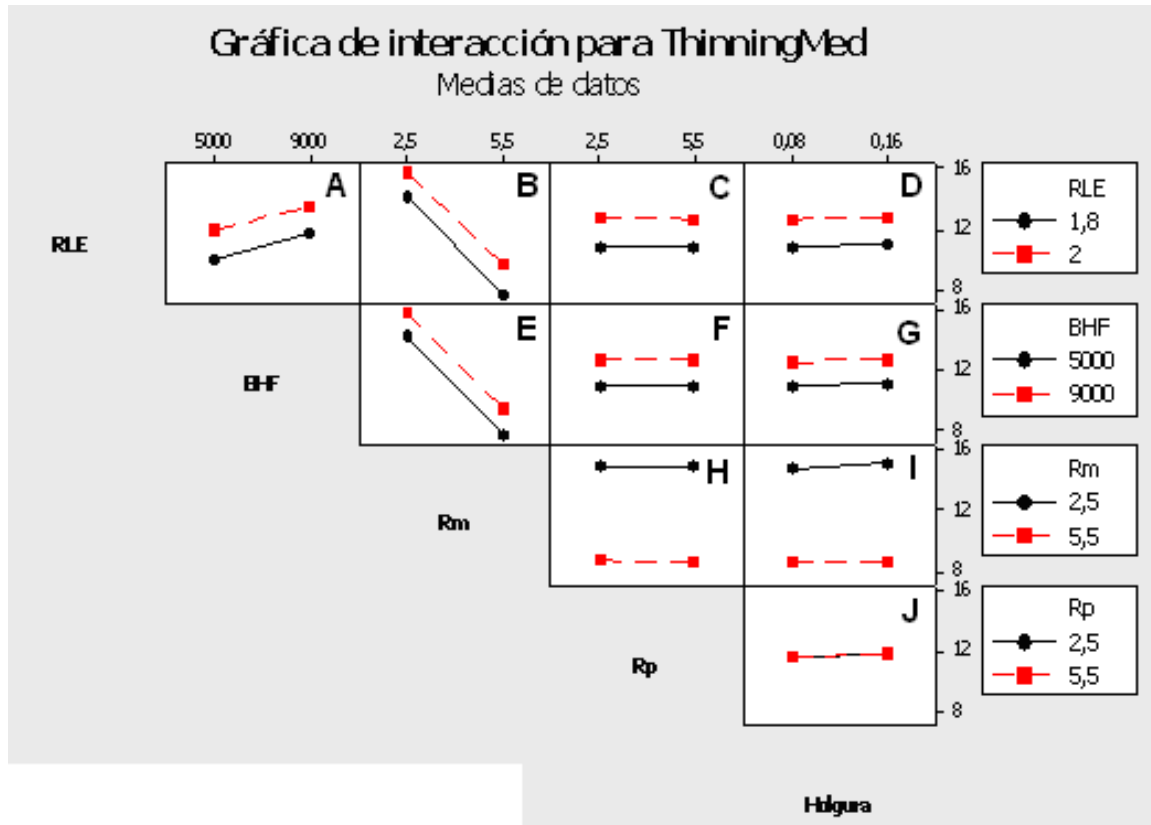
<u>RLE</u>	<u>BHF</u>	<u>Rm</u>	<u>Rp</u>	<u>Holgura</u>	<u>ThinningMed</u>
1,8	5000	2,5	2,5	0,08	13,28
2	5000	2,5	2,5	0,08	14,49
1,8	9000	2,5	2,5	0,08	14,21
2	9000	2,5	2,5	0,08	17,05
1,8	5000	5,5	2,5	0,08	6,69
2	5000	5,5	2,5	0,08	8,88
1,8	9000	5,5	2,5	0,08	8,56
2	9000	5,5	2,5	0,08	10,32
1,8	5000	2,5	5,5	0,08	13,43
2	5000	2,5	5,5	0,08	14,80
1,8	9000	2,5	5,5	0,08	14,91
2	9000	2,5	5,5	0,08	16,23
1,8	5000	5,5	5,5	0,08	6,59
2	5000	5,5	5,5	0,08	8,58
1,8	9000	5,5	5,5	0,08	8,19
2	9000	5,5	5,5	0,08	10,59
1,8	5000	2,5	2,5	0,16	13,04
2	5000	2,5	2,5	0,16	15,75
1,8	9000	2,5	2,5	0,16	15,70
2	9000	2,5	2,5	0,16	16,31
1,8	5000	5,5	2,5	0,16	6,54
2	5000	5,5	2,5	0,16	8,82
1,8	9000	5,5	2,5	0,16	8,42
2	9000	5,5	2,5	0,16	10,37
1,8	5000	2,5	5,5	0,16	13,50
2	5000	2,5	5,5	0,16	15,11
1,8	9000	2,5	5,5	0,16	14,97
2	9000	2,5	5,5	0,16	16,68
1,8	5000	5,5	5,5	0,16	6,68
2	5000	5,5	5,5	0,16	8,75
1,8	9000	5,5	5,5	0,16	8,52
2	9000	5,5	5,5	0,16	10,29

Tabla 1



Observando las gráficas de efectos principales, podemos ver que el efecto que más influye en la respuesta de la variable de salida (thinning) es el radio de la matriz (Rm). Si nos centramos en el , podemos observar que cuando éste varía de su mínimo a su máximo la variable de salida experimenta un gran cambio. Así pues con un radio en la matriz de 2,5 mm, el adelgazamiento que se experimente es del orden de 17% mientras que si aumentamos el radio hasta 5,5 mm, el adelgazamiento disminuiría hasta un 7 % más o menos.

En cuanto al resto comentar que los factores de Rp y holgura, al variar de su mínimo a su máximo tan apenas afectan a la variable de salida. Mientras que el RLE y el BHF muestran un ligero ascenso en el adelgazamiento al alcanzar sus máximos correspondientes, pero sin duda no comparable con la variación del Rm. Muestran un ascenso en torno al 2%.

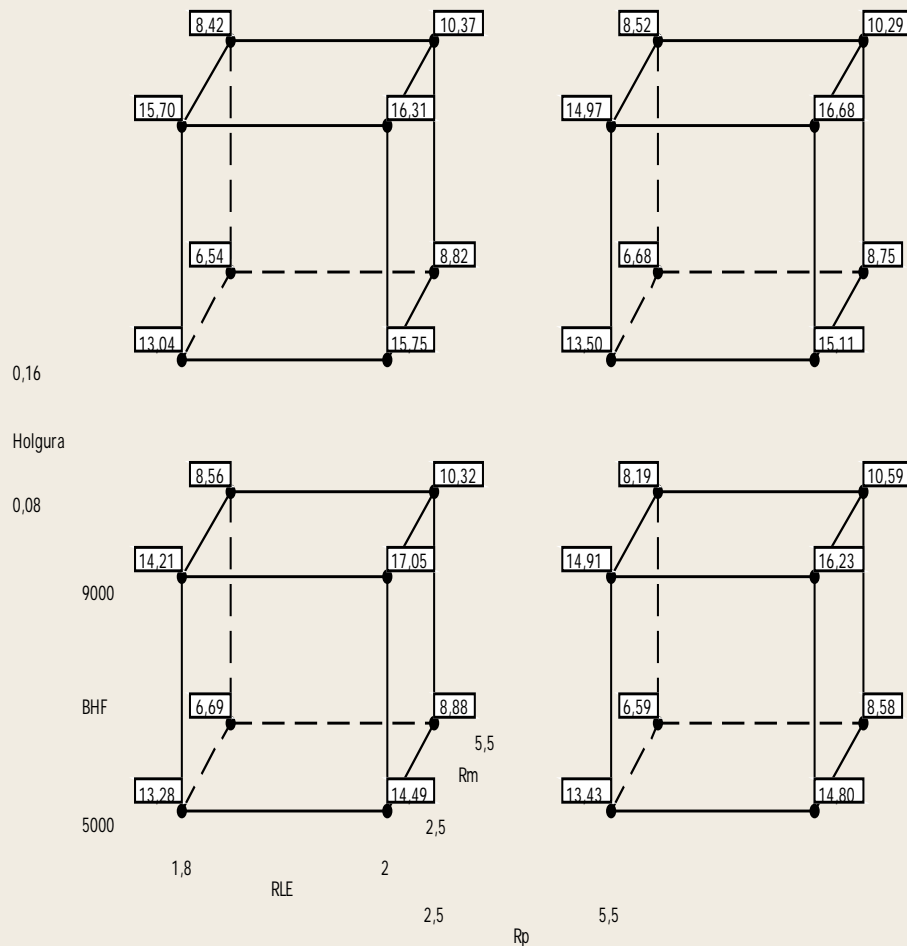


Observando las gráficas, rápidamente se observa que no hay interacción en ninguna de ellas. Se puede decir a grandes rasgos, que en todas ellas ambas rectas son más o menos paralelas.

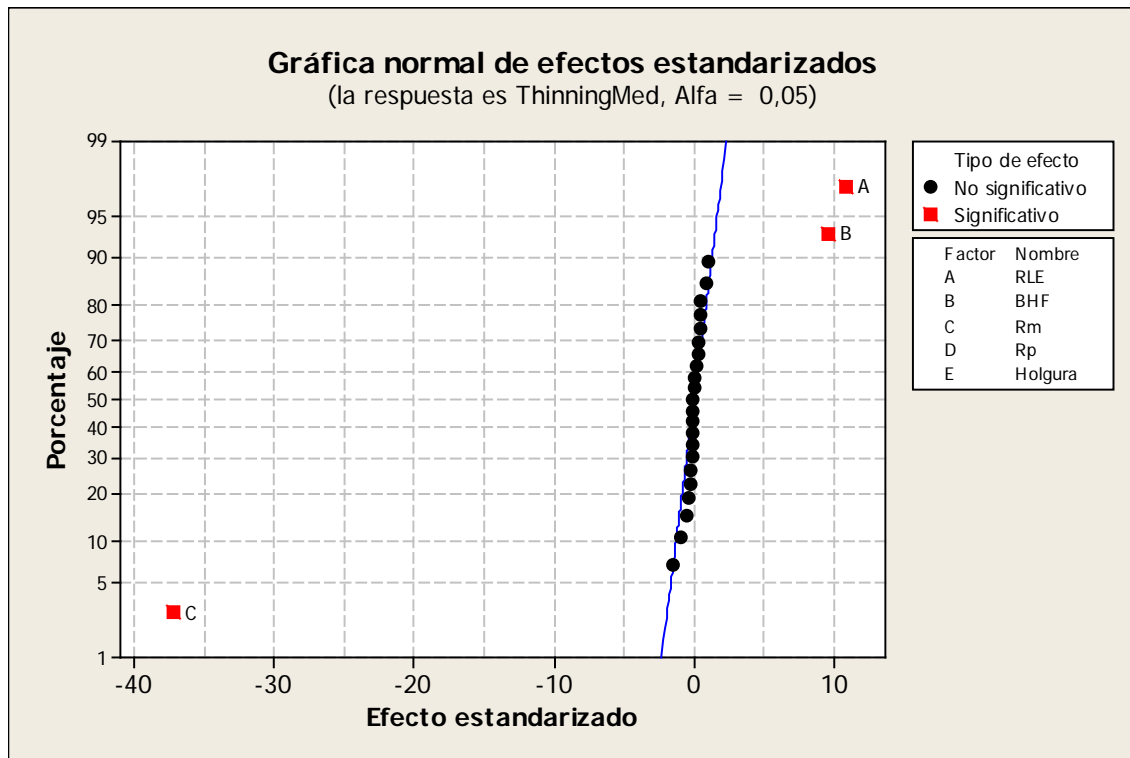
Si nos centramos en las gráficas B y E, vemos que al aumentar el Rm, los factores RLE y BHF, decrecen bruscamente pero con una pendiente similar, por lo que se demuestra que no hay interacción. Esto mismo se le puede aplicar a la gráfica A, aunque en este caso la pendiente sería contraria.

Por otro lado y para el resto de las gráficas, vemos que si el factor del eje horizontal aumenta, la respuesta del eje Y prácticamente no cambia en los dos niveles que tiene cada imagen. Así pues, en todas ellas no existe interacción, porque el efecto del factor del eje X no depende del nivel donde este el factor en Y, y viceversa.

Gráfica de cubos (medias de los datos) para ThinningMed



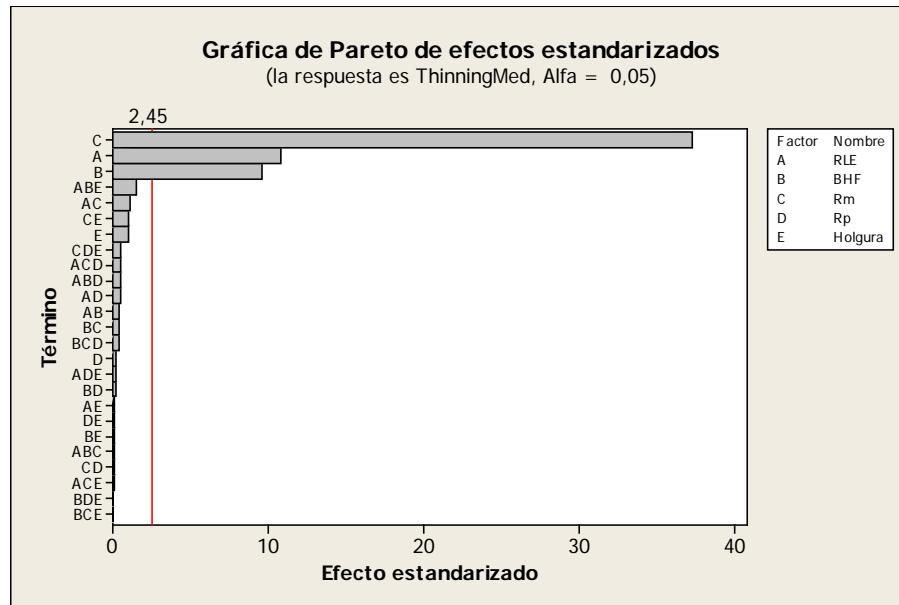
Si analizamos la gráfica de cubo compuesta por los factores mas influyentes para nuestra variable de respuesta (cubo inferior izquierdo), observamos que la cara frontal, donde el Rm es de 2'5 mm se dan los mayores adelgazamientos. Así pues, y centrándonos en esta cara, vemos que donde se maximiza nuestra variable thinning, es en el punto cuyas coordenadas corresponden a Rm =2,5 , RLE =2 y BHF= 9000. De esta manera y dándose estas condiciones, nuestra pieza sufrirá un adelgazamiento máximo de más de un 17 %.



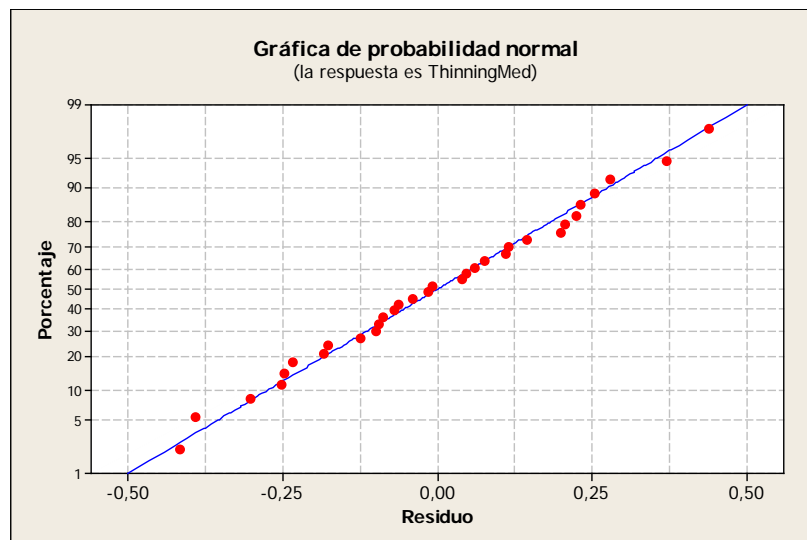
Se sabe que en este tipo de gráfica, los efectos que no son significativos tienden a formar una línea recta, mientras que los efectos activos aparecerán alejados de la línea de normalidad. Así pues, aquí vemos claramente coloreados en rojo los efectos que se salen de esa línea recta, por lo que serán éstos los más significativos. Por otro lado, dentro de estos, los más significativos serán los que estén más alejados.

De esta forma, el radio de la matriz, el RLE y el BHF son en los que se acusan estas características, y por lo tanto los más influyentes en nuestra variable de salida.

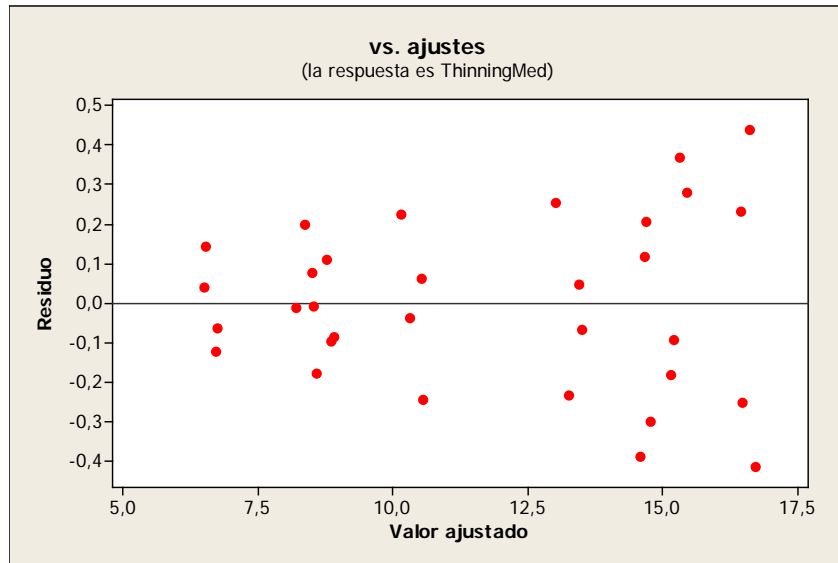
Además, dentro de estos 3, en Rm es el que está claramente más alejado de la línea recta, por lo que éste será el más significativo.



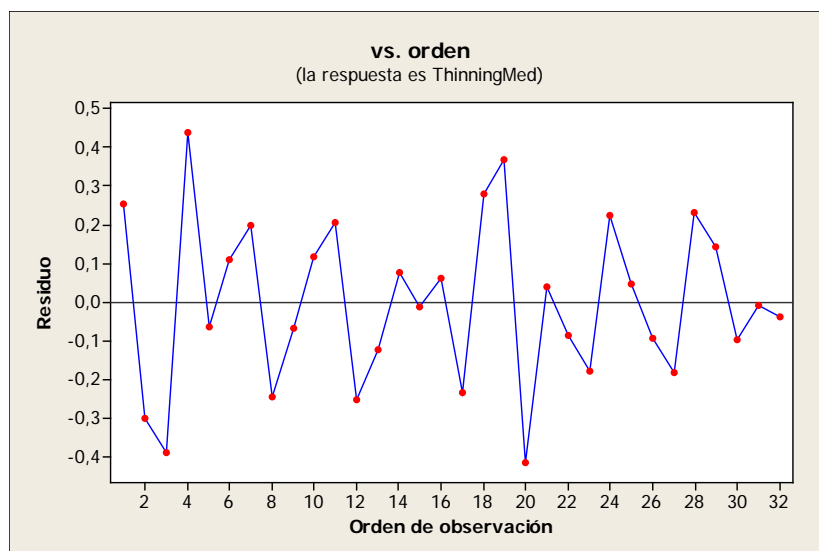
En la gráfica normal, es más difícil apreciar la importancia relativa de los efectos, pero es mejor que el Pareto para señalar cuáles efectos son activos. Por ello, lo mejor es utilizar ambas gráficas para decidir qué efectos mandar al error. Así pues en este se observa claramente los efectos activos (a la derecha de la línea en rojo) y confirmando lo observado en la gráfica normal, vemos que los más influyentes debido a su longitud en la gráfica, son de nuevo el Rm, RLE y BHF, por este orden



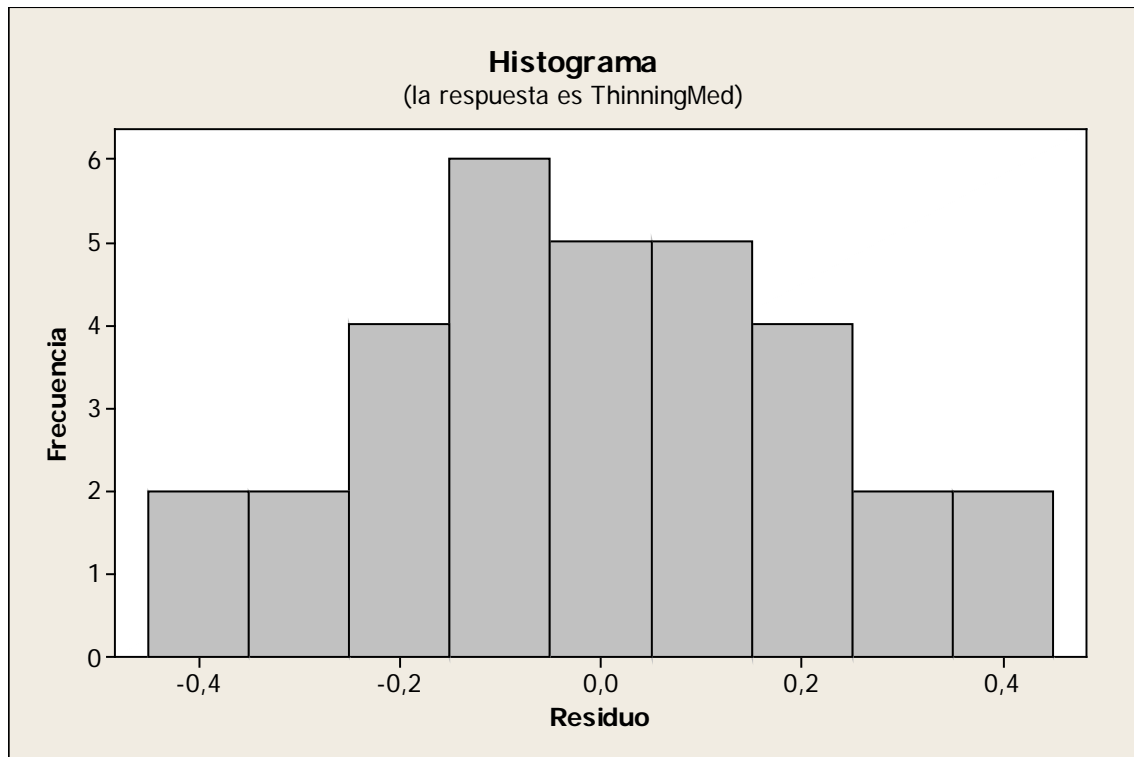
Los puntos de esta gráfica deben generalmente formar una línea recta si los residuos están normalmente distribuidos. Si los puntos en la gráfica salen de una línea recta, el supuesto de normalidad puede ser inválido. Así pues, y centrándonos en lo que vemos, se puede considerar que más o menos los puntos se acoplan a la línea por lo que moderadamente se cumpliría el supuesto de normalidad.



Esta gráfica deberá mostrar un patrón aleatorio de residuos a ambos lados de 0. Si un punto se encuentra lejos de la mayoría de los puntos, puede ser un valor atípico. No deberá haber algún patrón reconocible en la gráfica de residuos. Por ejemplo, si la dispersión de valores de residuos tiende a incrementarse a medida que se incrementan los valores ajustados, entonces esto puede violar el supuesto de varianza constante. De esta forma, analizando esta gráfica en concreto, se puede observar que al aumentar los valores ajustados los residuos no siguen una tendencia, es decir, aumentan y disminuyen aleatoriamente, por lo que no se viola el supuesto de varianza constante.



Esta es una gráfica de todos los residuos en el orden en el que se observaron los datos y puede utilizarse para hallar errores no aleatorios, especialmente de efectos relacionados con el tiempo. Analizando esta gráfica se puede revisar el supuesto que establece que los residuos no se correlacionan unos a otros.



El histograma, se trata de una herramienta exploratoria para mostrar las características generales de los residuos incluyendo valores típicos, dispersión y forma. Una larga cola lateral puede indicar una distribución sesgada. Si una o dos barras están lejos de las demás, esos puntos pueden ser valores atípicos.

En este caso se observa que más o menos la distribución de adecua a forma de campana en torno a la normal. De esta forma queda claro que no hay valores atípicos ni se trata de una distribución sesgada.

Resumen del ajuste factorial: ThinningMed vs. RLE; BHF; Rm; Rp; Holgura (extraído de Minitab).

Efectos y coeficientes estimados para ThinningMed (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef	Coef. de EE	T	P
Constante		11,758	0,08627	136,30	0,000
RLE	1,862	0,931	0,08627	10,79	0,000
BHF	1,649	0,825	0,08627	9,56	0,000
Rm	-6,417	-3,208	0,08627	-37,19	0,000
Rp	-0,038	-0,019	0,08627	-0,22	0,832
Holgura	0,166	0,083	0,08627	0,96	0,374
RLE*BHF	-0,067	-0,033	0,08627	-0,39	0,712
RLE*Rm	0,189	0,095	0,08627	1,10	0,314
RLE*Rp	-0,082	-0,041	0,08627	-0,47	0,652
RLE*Holgura	-0,023	-0,012	0,08627	-0,13	0,898
BHF*Rm	0,067	0,033	0,08627	0,39	0,712
BHF*Rp	-0,032	-0,016	0,08627	-0,18	0,860
BHF*Holgura	-0,016	-0,008	0,08627	-0,09	0,931
Rm*Rp	-0,013	-0,007	0,08627	-0,08	0,942
Rm*Holgura	-0,167	-0,083	0,08627	-0,97	0,371
Rp*Holgura	-0,018	-0,009	0,08627	-0,11	0,920
RLE*BHF*Rm	-0,014	-0,007	0,08627	-0,08	0,936
RLE*BHF*Rp	0,087	0,043	0,08627	0,50	0,633
RLE*BHF*Holgura	-0,262	-0,131	0,08627	-1,52	0,180
RLE*Rm*Rp	0,088	0,044	0,08627	0,51	0,628
RLE*Rm*Holgura	-0,011	-0,005	0,08627	-0,06	0,953
RLE*Rp*Holgura	0,033	0,017	0,08627	0,19	0,854
BHF*Rm*Rp	0,063	0,032	0,08627	0,37	0,727
BHF*Rm*Holgura	0,002	0,001	0,08627	0,01	0,992
BHF*Rp*Holgura	0,003	0,002	0,08627	0,02	0,986
Rm*Rp*Holgura	0,092	0,046	0,08627	0,53	0,614

S = 0,487997 PRESS = 40,6427

R-cuad. = 99,63% R-cuad.(pred.) = 89,36% R-cuad.(ajustado) = 98,07%

Análisis de varianza para ThinningMed (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F
Efectos principales	5	379,137	379,137	75,8275	318,41
2-Interacciones de (No.) factores	10	0,653	0,653	0,0653	0,27
3-Interacciones de (No.) factores	10	0,782	0,782	0,0782	0,33
Error residual	6	1,429	1,429	0,2381	
Total	31	382,002			

Fuente	P
Efectos principales	0,000
2-Interacciones de (No.) factores	0,965
3-Interacciones de (No.) factores	0,942
Error residual	
Total	

Observaciones inusuales de ThinningMed

						Residuo
Obs	OrdenEst.	ThinningMed	Ajuste	Ajuste SE	Residuo	estándar
4	4	17,0500	16,6119	0,4399	0,4381	2,07R

R denota una observación con un residuo estandarizado grande.

E.3 Análisis de resultados de los ensayos en prensa

Para acortar el número de ensayos y teniendo en cuenta los resultados anteriores, se decide ensayar sólo con una holgura del 10%, ya que se ve que no es influyente este factor y que en todo caso, ensayar con holgura mayor lo único que podría hacer es empeorar las piezas finales. Esto se deduce porque al ensayar las piezas se observa un pequeño escalón bajo el radio, éste sale cuando la holgura ya es alta. Así pues, no tenía sentido ensayar con la otra holgura del 20%.

En la siguiente tabla se resume el resultado de las piezas realizadas con las siguientes combinaciones de factores.

RLE	BHF (Kg)	Rm (mm)	Rp (mm)	Holgura (mm)	Adelgazamiento(%)
1,8	5000	2,5	2,5	0,08	Rompe
2	5000	2,5	2,5	0,08	Rompe
1,8	9000	2,5	2,5	0,08	Rompe
2	9000	2,5	2,5	0,08	Rompe
1,8	5000	5,5	2,5	0,08	7'5
2	5000	5,5	2,5	0,08	9'4
1,8	9000	5,5	2,5	0,08	9'1
2	9000	5,5	2,5	0,08	Rompe
1,8	5000	2,5	5,5	0,08	Rompe
2	5000	2,5	5,5	0,08	Rompe
1,8	9000	2,5	5,5	0,08	Rompe
2	9000	2,5	5,5	0,08	Rompe
1,8	5000	5,5	5,5	0,08	7'6
2	5000	5,5	5,5	0,08	8'9
1,8	9000	5,5	5,5	0,08	8'5
2	9000	5,5	5,5	0,08	Rompe

Mirando la columna de la derecha se puede observar el resultado de nuestras 16 piezas según la combinación de los factores que se pueden observar en las columnas anteriores. Se aprecia que muchas de nuestras piezas han llegado a rotura. Analizándolo un poco a fondo se puede decir que todas las piezas fabricadas con el radio de la matriz de 2,5 mm han llegado a romper. En cuanto a las fabricadas con radio de la matriz igual a 5,5 mm, sólo han roto en el caso de RLE=2 y BHF=9000kg.

En cuanto a las piezas no rotas, se observan unos valores de adelgazamientos de acuerdo a lo esperado según la simulación.

E.4 Conclusiones. Comparación simulación & ensayos

Tras observar los resultados mostrados en los apartados anteriores, tanto en simulación como en la fabricación de las piezas reales, se pasa a extraer las siguientes conclusiones principales:

- Los resultados obtenidos en la simulación no se ajustan a los resultados obtenidos en las piezas de copa cilíndrica reales. En el 62% de los casos los resultados no se corresponden. Las piezas llegan a la rotura cuando el resultado de la simulación valoraba que no se llegaría a tal extremo.
- En el 38% de casos restantes, es decir, cuando las piezas no llegan a romper, el resultado de nuestra variable de estudio, adelgazamiento, si se corresponde con los valores que anteriormente se extraían de la simulación.
- El factor más influyente en nuestra variable de respuesta adelgazamiento, es el radio de la matriz. A continuación influye el RLE y el BHF con mucha menos importancia respecto al primero. Aún así son factores muy a tener en cuenta.
- El factor del radio del punzón y la holgura interfieren de manera poco significativa en el adelgazamiento de las piezas.

A continuación y después de conocer las conclusiones principales o generales, se pasan a citar otras más particulares o que de alguna forma derivan de las anteriores:

- La variable denominada Unknown, es decir aquellos factores que no podemos controlar, aunque según la simulación no es demasiado grande, a juzgar por los resultados parece que es determinante.
- El método elegido de colocar tres células de carga en las velas y otra en el punzón es adecuado para tener en todo momento registrada la presión que se ejerce.
- Se realiza un estudio adicional variando el coeficiente de fricción del lubricante, y no se observan cambios significantes en el resultado de la simulación
- Se realiza una prueba real, rebajando un poco el diámetro del punzón y de esta forma aumentar la holgura, y se observa que tal y como decía el estudio previo, ésta no influye en el resultado final. Es más, cuando se aumenta la holgura, se empieza a observar un pequeño escalón debajo del radio. Este defecto viene causado por excesiva holgura. No conviene pues aumentarla más.

- Se realiza un estudio de cálculo del valor de n de nuestro material en relación de la deformación en cada momento, y se concluye que para este caso con una n para todo el rango de deformación es suficiente. No se aprecian diferencias significativas entre las n parciales y la n general.
- Como ya se sabe, las ventajas del método de elementos finitos son notorias, sin embargo en nuestro caso no han sido satisfactorias.
- Las piezas se rompen por una gradación excesiva en la embutición. Con el radio de la matriz de 2,5mm el escalonado es excesivamente grande en relación a la embutibilidad de este material. Los fondos se rompen, ya antes de formarse la pared lateral, en la zona muy próxima a la brida de la chapa, permaneciendo unidos a ésta solamente en una estrecha zona, por la cual se elevan como si se tratara de una bisagra.
- La zona donde se producen los mayores adelgazamientos, se da en la pared a unos 16 mm de su parte superior. Cada 90° se observa una zona de estas más críticas.

Anexo F. Estudio adicional. Caracterización del material.

Tras una mala correspondencia entre los resultados de la simulación y de los ensayos, y tras comprobar que no hay ninguna causa en el resto de elementos que interfieren en el estudio, se propone realizar un estudio más a fondo en la caracterización de nuestro material.

Nuestra chapa fue simulada según los valores que nos proporcionó una empresa externa. Sin embargo, antes de concluir definitivamente afirmando esa mala correspondencia, se decide realizar este segundo estudio del material, esta vez realizado por nosotros, para poder extraer algunos parámetros muy importantes para el desarrollo de nuestra simulación. Así pues se decide extraer el parámetro r o de Lankford (capacidad de nuestro material para la embutibilidad) y el factor de endurecimiento n , el cual nos podría modificar nuestra línea límite de conformado.

Se sospecha, que quizás pudiendo obtener los valores de r a 0,45 y 90 grados, así como una n que se adapte mucho más a la curva real del ensayo de tracción del material, nuestros resultados simulados puedan ser más parecidos a los reales extraídos en nuestras piezas.

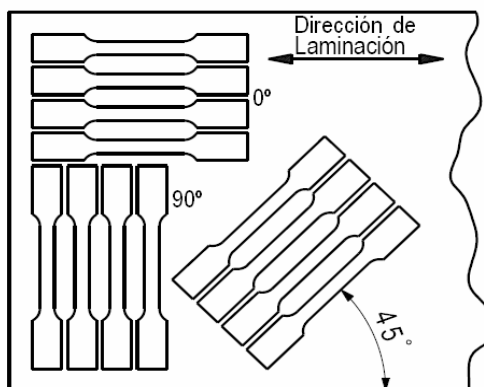
F.1 Procedimiento de los ensayos de tracción

1.- Lo primero es proceder al estudio de las 2 normas que rigen cómo hacer estos ensayos. Ambas se pasan a citar a continuación:

- “Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n - Values) of Metallic Sheet Materials”
- “Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal”

2.- En segundo lugar se pasa a abrir el programa para estos ensayos, su nombre es Merlín. Una vez se encuentra la aplicación en marcha hay que preparar o programar el método que vamos a utilizar. Es decir definir todos los parámetros para realizar los ensayos de tracción. Algunos ejemplos de parámetros imprescindibles de definir son la velocidad (según marca la norma), lo que se quiere medir (carga y deformación en este caso) o cada que intervalo se toman datos.

3.- Preparar las probetas según las cotas que marca la norma. Además es necesario que tengamos cortadas probetas a 0° , 45° y 90° .



4.- Colocar la probeta en las mordazas de la máquina y acoplarle el extensómetro.



5.- Calibrar el extensómetro y reiniciar a 0 carga y de deformación.



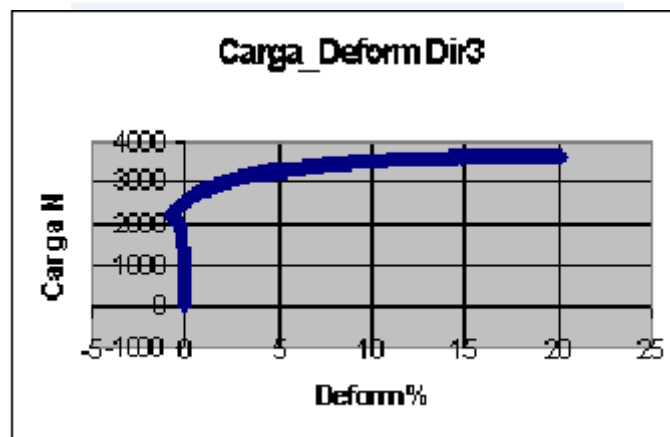
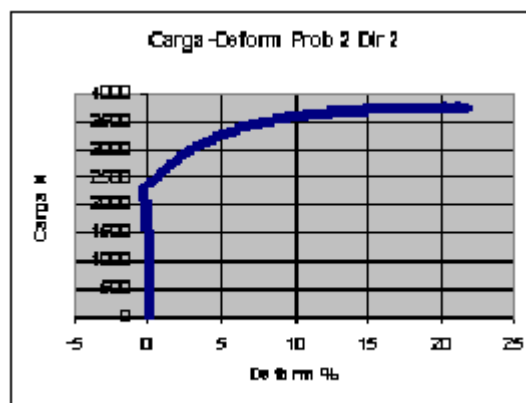
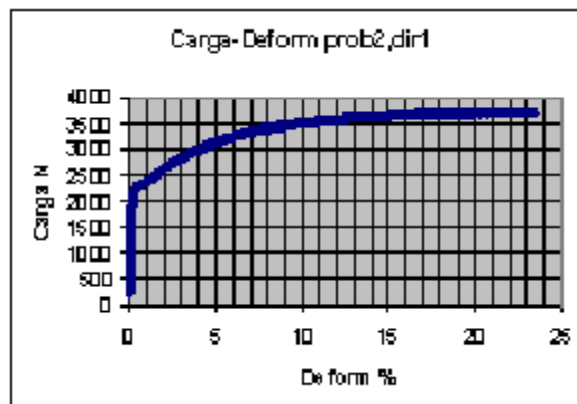
6.- Comenzar el ensayo. En este caso no es necesario llegar a la rotura. Además sería peligroso llegar a tal estado ya que el extensómetro podría ser dañado. Una vez se observa que ya no aumenta más la carga se para el ensayo y se importan los datos a excel para trabajar con ellos.



F.2 Extracción de datos

Una vez finalizado el ensayo, se entra en archivo> datos> finalizar y guardar y definimos en que carpeta los guardamos.

Quedarán guardados con una extensión .raw. A continuación la forma de proceder es abrir excell y desde aquí abrir estos archivos. De esta forma los datos quedaran ordenados por columna. A continuación se muestran los datos en forma de gráfico para que sean más explícitos a primera vista. Cada gráfico representa una dirección. Por limitación del ordenador de trabajo allí, no se pueden observar mejores gráficos.



F.3 Cálculos y análisis

Se procede a realizar los cálculos según marca la norma.

❖ CÁLCULO DE r:

$$L_o = 25\text{mm}, W_o = 14'15\text{mm}$$

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t$$

$$\epsilon_t = \ln (L_o W_o / L_f W_f)$$

$$\epsilon_w = \ln (W_f / W_o)$$

○ Para 0°

$$\epsilon_t = \ln (L_o W_o / L_f W_f) = -0'0648$$

$$\epsilon_w = \ln (W_f / W_o) = -0'1458$$

$$r_o = \epsilon_w / \epsilon_t = 2'25$$

○ Para 45°

$$\epsilon_t = \ln (L_o W_o / L_f W_f) = -0'0656$$

$$\epsilon_w = \ln (W_f / W_o) = -0'1176$$

$$r_{45} = \epsilon_w / \epsilon_t = 1'79$$

○ Para 90°

$$\epsilon_t = \ln (L_o W_o / L_f W_f) = -0'0584$$

$$\epsilon_w = \ln (W_f / W_o) = -0'1385$$

$$r_{90} = \epsilon_w / \epsilon_t = 2'36$$

$$r_m = r_{90} + 2 \times r_{45} + r_o / 4 \Rightarrow r_m = 2'0475 \quad \Delta r = r_{90} - 2 \times r_{45} + r_o / 2 = 0'515$$

❖ CÁLCULO DE n :

La tensión utilizada en la curva tensión-deformación es la tensión media longitudinal producida en la probeta de tracción. Se obtiene dividiendo la carga por el área de la sección inicial de la probeta.

- Ensayo ingenieril:

$$\text{Tensión ingenieril } s = F/A_0$$

$$\text{Deformación ingenieril } e = \Delta L/L_0$$

La curva ingenieril no proporciona una indicación de las características de deformación de un metal porque está basada totalmente sobre las dimensiones iniciales de la probeta y estas cambian constantemente durante el ensayo. Además, los metales sufren estricción localizada durante la última fase del ensayo, la carga requerida para continuar la deformación disminuye en esta fase a causa de que el área de la sección transversal de la probeta se va reduciendo rápidamente. La tensión media basada en la sección inicial disminuye también, produciéndose como consecuencia de esto un descenso de la curva tensión-deformación después del punto de carga máxima. En realidad, el metal continúa endureciéndose por deformación hasta que se produce la fractura, de modo que también debería aumentar la tensión requerida para producir mayor deformación. Si se utiliza la tensión real o verdadera basada en el área instantánea de la sección transversal de la probeta, se encuentra que la curva tensión-deformación asciende de modo continuo hasta que se produce la rotura.

Por tanto se utilizan coordenadas verdaderas

- Ensayo coordenadas verdaderas

$$\text{Tensión verdadera } \sigma = F/A; \sigma = s(1+e)$$

$$\text{Deformación verdadera } \epsilon = \ln(L/L_0) = \ln(1+e)$$

- Para facilitar los cálculos mostrados en las tablas:

$$Y = \log \sigma$$

$$X = \log \varepsilon$$

$$\text{Step1} = \Sigma X \times \Sigma Y / N$$

$$\text{Step2} = S_{xy} = \Sigma XY - \text{Step1}$$

$$Step3 = (\Sigma X)^2 / N$$

$$\text{Step4} = S_{xx} = \sum X^2 - \text{Step3}$$

- Cálculo de n para el intervalo de adelgazamiento 3 – 18%

puntos	Carga N	e	s	Tension Verd	Y	Y cuadrado	Def.Verd	X	X cuadrado	XY
1	2825	0,03	249,558	257,045	2,410	5,808	0,030	-1,529	2,339	-3,686
2	3235	0,06	285,777	302,924	2,481	6,157	0,058	-1,235	1,524	-3,063
3	3450	0,09	304,770	332,200	2,521	6,357	0,086	-1,065	1,133	-2,684
4	3570	0,12	315,371	353,216	2,548	6,493	0,113	-0,946	0,894	-2,410
5	3637	0,15	321,290	369,483	2,568	6,593	0,140	-0,855	0,730	-2,194
6	3676	0,18	324,735	383,187	2,583	6,674	0,166	-0,781	0,610	-2,018
				SumY	15,112				SumX	-6,410
	Ainicial=	11,32								
	N=	6		SumYcuadra	38,082				SumXcuadr	7,231
									SumXY	-16,055
	Step1=	-16,144		Step2=	0,089					
	Step3=	6,848		Step4=	0,383					
				n=	0,232					

Ante este resultado, y al ver que este valor de n no difiere tan apenas del utilizado en la simulación, se decide realizar un estudio de la n más a fondo. Ahora en lugar de calcular la n según la pendiente de una recta que asemeja a la curva del diagrama tensión – deformación, se decide hacerlo más real, realizando el ajuste a esta curva ahora con 3 rectas, de forma que extraeremos tres valores de n para cada intervalo de adelgazamiento. Los intervalos seleccionados son 2-7%, 8-13% y 14-19%.

Se quiere ver si la simulación con un solo valor de n para toda la curva es válida o por el contrario dista mucho de la realidad, y en ese caso es necesario utilizar distintos valores de n en función de los valores de las deformaciones.

- | puntos | Carga N | e | s | Tension Verd | Y | Y cuadrado | Def.Verd | X | X cuadrado | XY |
|--------|-----------|---------|---------|--------------|--------|------------|----------|--------|------------|---------|
| 1 | 2622 | 0,02 | 231,625 | 236,258 | 2,373 | 5,633 | 0,020 | -1,703 | 2,901 | -4,043 |
| 2 | 2825 | 0,03 | 249,558 | 257,045 | 2,410 | 5,808 | 0,030 | -1,529 | 2,339 | -3,686 |
| 3 | 2984 | 0,04 | 263,604 | 274,148 | 2,438 | 5,944 | 0,039 | -1,406 | 1,978 | -3,429 |
| 4 | 3122 | 0,05 | 275,795 | 289,585 | 2,462 | 6,060 | 0,049 | -1,312 | 1,720 | -3,229 |
| 5 | 3232 | 0,06 | 285,512 | 302,643 | 2,481 | 6,155 | 0,058 | -1,235 | 1,524 | -3,063 |
| 6 | 3326 | 0,07 | 293,816 | 314,383 | 2,497 | 6,237 | 0,068 | -1,170 | 1,368 | -2,921 |
| | | | | SumY | 14,662 | | | | SumX | -8,355 |
| | Ainicial= | 11,32 | | | | | | | | |
| | N= | 6 | | SumYcuadra | 35,838 | | | | SumXcuadr | 11,831 |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | SumXY | -20,370 |
| | Step1= | -20,416 | | Step2= | 0,046 | | | | | |
| | Step3= | 11,634 | | Step4= | 0,197 | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | n= | 0,233 | | | | | |

- | puntos | Carga N | e | s | Tension Verd | Y | Y cuadrado | Def.Verd | X | X cuadrado | XY |
|--------|-----------|---------|---------|--------------|--------|------------|----------|--------|------------|---------|
| 1 | 3392 | 0,08 | 299,647 | 323,618 | 2,510 | 6,300 | 0,077 | -1,114 | 1,240 | -2,795 |
| 2 | 3450 | 0,09 | 304,770 | 332,200 | 2,521 | 6,357 | 0,086 | -1,065 | 1,133 | -2,684 |
| 3 | 3499 | 0,10 | 309,099 | 340,009 | 2,531 | 6,408 | 0,095 | -1,021 | 1,042 | -2,584 |
| 4 | 3536 | 0,11 | 312,367 | 346,728 | 2,540 | 6,452 | 0,104 | -0,981 | 0,963 | -2,493 |
| 5 | 3570 | 0,12 | 315,371 | 353,216 | 2,548 | 6,493 | 0,113 | -0,946 | 0,894 | -2,410 |
| 6 | 3597 | 0,13 | 317,756 | 359,064 | 2,555 | 6,529 | 0,122 | -0,913 | 0,833 | -2,333 |
| | | | | SumY | 15,206 | | | | SumX | -6,039 |
| | Ainicial= | 11,32 | | | | | | | | |
| | N= 6 | | | SumYcuadra | 38,539 | | | | SumXcuadr | 6,107 |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | SumXY | -15,299 |
| | Step1= | -15,305 | | Step2= | 0,006 | | | | | |
| | Step3= | 6,079 | | Step4= | 0,028 | | | | | |
| | | | | n= | 0,224 | | | | | |

- | puntos | Carga N | e | s | Tension Verd | Y | Y cuadrado | Def.Verd | X | X cuadrado | XY |
|--------|-----------|---------|---------|--------------|--------|------------|----------|--------|------------|---------|
| 1 | 3620 | 0,14 | 319,788 | 364,558 | 2,562 | 6,563 | 0,131 | -0,883 | 0,779 | -2,261 |
| 2 | 3641 | 0,15 | 321,643 | 369,890 | 2,568 | 6,595 | 0,140 | -0,855 | 0,730 | -2,195 |
| 3 | 3655 | 0,16 | 322,880 | 374,541 | 2,573 | 6,623 | 0,148 | -0,829 | 0,686 | -2,132 |
| 4 | 3665 | 0,17 | 323,763 | 378,803 | 2,578 | 6,648 | 0,157 | -0,804 | 0,647 | -2,073 |
| 5 | 3676 | 0,18 | 324,735 | 383,187 | 2,583 | 6,674 | 0,166 | -0,781 | 0,610 | -2,018 |
| 6 | 3684 | 0,19 | 325,442 | 387,276 | 2,588 | 6,698 | 0,174 | -0,760 | 0,577 | -1,966 |
| | | | | SumY | 15,453 | | | | SumX | -4,911 |
| | Ainicial= | 11,32 | | | | | | | | |
| | N= 6 | | | SumYcuadra | 39,801 | | | | SumXcuadr | 4,030 |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | SumXY | -12,645 |
| | Step1= | -12,647 | | Step2= | 0,002 | | | | | |
| | Step3= | 4,019 | | Step4= | 0,011 | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | n= | 0,212 | | | | | |

Victor Cásedas Tejada - MSM